

# Лекц 14

## ЦАХИЛГААН



### 14.1 Цахилгаан орон дахь дамжуулагч

Дамжуулагч дахь цэнэг зөөгчид нь цахилгаан орны нөлөөгөөр шилжин хөдөлж чаддаг. Иймээс дараах нөхцөлүүд биелж байвал цэнэг зөөгчид нь тэнцвэрийн нөхцөлд байж чадна.

1. Дамжуулагч доторх цахилгаан орны хүчлэг нь ямагт тэг байна ( $E = 0$ ). Учир нь цахилгаан орны хүчлэг нь потенциалтай

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$$

хамааралтай байдаг. Дамжуулагчийн дотор потенциал тогтмол ( $\varphi = \text{const}$ ) байхын тулд  $E = 0$  байхаас өөр аргагүй.

$$E = 0 \quad (14.1)$$

2. Дамжуулагчийн гадаргуу орчимд цахилгаан орны хүчлэг нь гадаргуугийн нормалийн дагуу чиглэнэ. Хэрэв цахилгаан орны хүчлэгийг  $E$  гэвэл цахилгаан орны нормаль байгуулагч  $E_n$  нь

$$E = E_n \quad (14.2)$$

Цэнэгүүд тэнцвэртэй байгаагаас дамжуулагчийн гадаргуу нь ижил потенциалт гадаргуу болох нь харагдаж байна. Хэрэв дамжуулагчийн гадаргуу орчимд цахилгаан орны хүчлэг хэвтээ байгуулагчтай байсан бол цэнэгүүд хурдсан хөдлөх билээ.

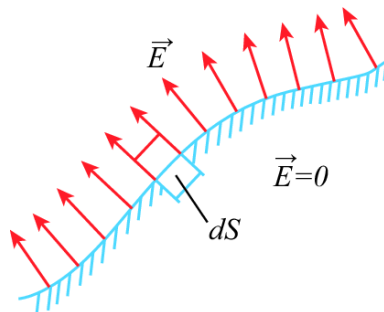
Дамжуулагчид  $q$  хэмжээтэй цэнэг өгвөл энэ цэнэг нь дамжуулагч дотуур тархан шилжиж дахин тэнцвэрт байдалдаа орно. Одоо дамжуулагчийн дотор бүхлээрээ багтах ямар нэгэн битүү гадаргууг санаандаа авъя. Ийм гадаргууг Гауссын гадаргуу ч гэж бас нэрлэдэг. Гауссын теорем ёсоор энэ гадаргуугаар урсан гарах цахилгаан орны хүчлэгийн векторын урсгал нь тухайн гадаргуу доторх цэнэгийн хэмжээтэй

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

хамааралтай байдаг.

Дамжуулагчийн дотор цахилгаан орны хүчлэг тэг байх тул энэ битүү гадаргуу доторх цэнэгийн хэмжээ тэг байх ёстой болж байна. Битүү гадаргууг дамжуулагчийн гадаргуугаас төгсгөлгүй бага зайтай авч болно. Ингэхэд мөн л Гауссын теорем ёсоор энэ

битүү гадаргуу доторх цэнэг нь тэг болно. Иймээс тэнцвэртэй төлөвт байгаа дамжуулагчид өгсөн цэнэг гадаргуу дээр л байж таарах нь ээ. Үүнийг бас өөрөөр тайлбарлаж болно. Дамжуулагчид  $q$  цэнэг өгөхөд цэнэг зөөгчид нь бие биетэйгээ түлхэлцэх тул байж болох хамгийн алс зайд очигцооно. Энэ нь дамжуулагчийн гадаргуу байх нь мэдээж.



Зураг 14.1. Дамжуулагчийн гадаргуу орчмын цахилгаан орон

Гадаргуу дээр тарсан цэнэгийг гадаргуугийн цэнэгийн нягтаар илэрхийлдэг билээ. Энэ цэнэгийн нягт ямар байхыг олж. Цэнэгтэй дамжуулагчийн гадаргуугийн ойролцоо  $dS$  суурийн талбайтай, өчүүхэн бага цилиндр гадаргууг санаандаа авъя. Цилиндрийн доод суурь нь дамжуулагчийн дотор талд, харин орой нь дамжуулагчийн гадна талд байна гэж саная. 14.1-р зургийг харна уу. Энэ цилиндр хэлбэртэй битүү гадаргуугаар урсан гарч байгаа цахилгаан орны шилжилтийн векторын урсгал нь зөвхөн цилиндрийн оройгоор нэвтрэн гарах тул  $DdS$  байх нь тодорхой.

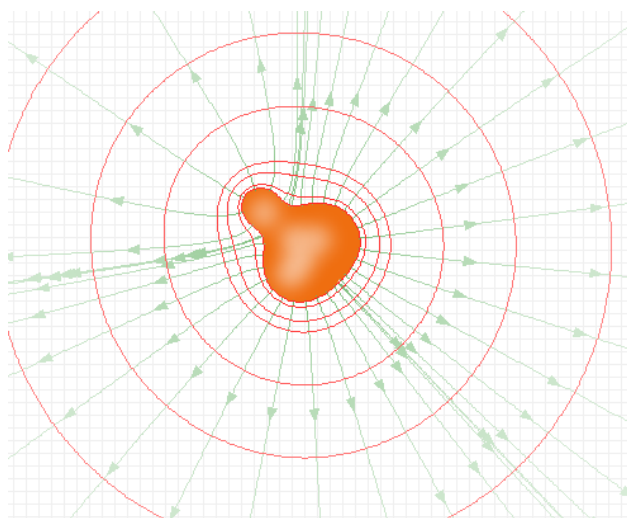
Гауссын теоремыг хэрэглэвэл:

$$DdS = dq = \sigma \cdot dS$$

буюу  $D = \sigma$  болж байна. Харин цахилгаан орны хүчлэг нь

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (14.3)$$

Энд буй  $\epsilon$  нь дамжуулагч буй орчны харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар юм.



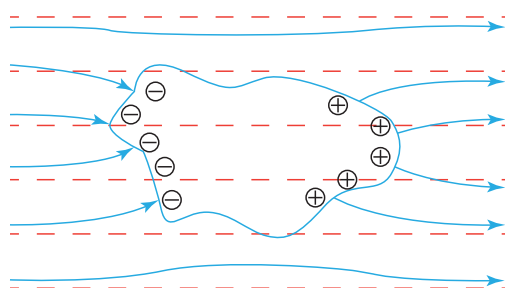
Зураг 14.2. Цэнэгтэй дамжуулагчийн цахилгаан орон

14.2-р зурагт эерэг цэнэгтэй дамжуулагчийн ойролцоох болон түүнээс нэлээд алслагдсан зайд цахилгаан орны хүчлэгийн шугам болон ижил потенциалт гадаргууг харуулжээ. Дамжуулагчид ойр байх тутам ижил потенциалт гадаргуу нь дамжуулагчийн

хэлбэртэй адил байна. Хүчлэгийн шугам нь ижил потенциалт гадаргуугийн шүргэгчид перпендикуляр байх тул дамжуулагчийн гадаргуугийн нормалийн дагуу чиглэлтэй байна. Харин дамжуулагчаас холдох тутам цэгэн цэнэгийн үүсгэсэн цахилгаан орныхтой төсөөтэй болж байна.

### 14.1.1 Гаднын цахилгаан орон дахь дамжуулагч

$\vec{E}$  хүчлэгтэй цахилгаан оронд цэнэггүй дамжуулагчийг оруулъя. Ингэхэд цахилгаан орны нөлөөгөөр түүн дахь цэнэг зөөгчүүд хөдөлгөөнд орж, шилжин хөдөлнө. Эерэг цэнэгүүд нь  $\vec{E}$  хүчлэгийн дагуу, харин сөрөг цэнэг нь эсрэг зүгт шилжиж, дамжуулагчийн хоёр тал цэнэгтэй болно. Энэ үзэгдлийг индукцээр цэнэгжих үзэгдэл гэдэг. Харин хоёр талд ялгарсан цэнэгийн нөлөөгөөр дамжуулагчийн дотор талд гаднын цахилгаан орны эсрэг чиглэлтэй цахилгаан орон үүснэ. 14.3-р зургийг харна уу.



Зураг 14.3. Цэнэгтэй дамжуулагчийн цахилгаан орон.

Энэ цахилгаан орны хэмжээ гаднын цахилгаан орны хэмжээтэй тэнцүү болж, дамжуулагч доторх нийлбэр цахилгаан орон тэг болоход цэнэг зөөгчдийн шилжих хөдөлгөөн зогсоно.

Цэнэггүй дамжуулагчийг цахилгаан оронд оруулахад цахилгаан орны хүчлэгийн шугам нь индукцээр сөрөг цэнэгтэй болсон тал дээр төгсөж, индукцээр эерэг цэнэгтэй болсон талаас дахин үргэлжилж байгаа нь 14.3-р зургаас харагдаж байна. Дамжуулагчийг цэнэглэвэл цэнэг нь гадаргуу дээр тардаг тухай өмнө үзсэн. Индукцийн цэнэг ч мөн дамжуулагчийн гадаргуу дээр байрлана. Хэрэв дамжуулагч дотор ямар нэгэн хөндий байвал индукцийн цэнэгийн тархалтын улмаас хөндий доторх цахилгаан орон ч мөн тэг байна. Энэ үзэгдэл дээр үндэслэж цахилгаан статик орноос хамгаалдаг Фарадейн бүрхүүл<sup>1</sup> хэмээх төхөөрөмжийг бүтээдэг. Фарадейн бүрхүүлийг заавал битүү цул хийх албагүй, тор мэт хийсэн ч болдог.

## 14.2 Дамжуулагчийн багтаамж, конденсатор

Дамжуулагчийг цэнэглэхэд цэнэг нь гадаргуу дээгүүр тархан байршиж, дамжуулагчийн доторх цахилгаан орон тэг хэвээр үлддэг тухай бид ярилцсан билээ.  $q$  цэнэгтэй дамжуулагчид дахин  $q$  цэнэг өгье. Хоёр дахь удаа өгсөн цэнэгийн тархалттай яг ижил байдлаар тарна. Хэрэв өөр байдлаар тарвал дамжуулагчийн доторх цахилгаан орны хүчлэг тэгээс ялгаатай болох билээ. Өөрөөр хэлбэл дамжуулагчийн цэнэгийг нэмэгдүүлэхэд дамжуулагчийн цэнэгийн тархалт өөрчлөгдөхгүй. Иймээс цор ганц дамжуулагчийн потенциал нь түүний цэнэгтэй шууд хамааралтай байна.

$$q = C\varphi \quad (14.4)$$

<sup>1</sup>Заримдаа Фарадейн тор гэж нэрлэдэг.



Энд байгаа пропорционалын коэффициентийг дамжуулагчийн цахилгаан багтаамж<sup>2</sup> гэдэг.

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (14.5)$$

Одоо  $R$  радиустай бөмбөрцгийн потенциалыг олж. Бөмбөрцөг нь нэгэн төрлийн  $\varepsilon$  харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэлттэй, хязгааргүй том орчин дотор байгаа гээ. Хүчлэг ба потенциалын хоорондын хамаарлаас потенциалыг олбол:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \int_R^\infty \frac{q}{r^2} dr = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \frac{q}{R} \quad (14.6)$$

14.5 ба 14.6 томьёонуудаас багтаамжийг олбол:

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R \quad (14.7)$$

Цахилгаан багтаамжийг Фарад хэмээх нэгжээр хэмждэг. Дамжуулагчид 1Кл цэнэг өгөхөд потенциал нь 1В-оор нэмэгдэж байвал тухайн дамжуулагчийн багтаамж нь 1Фарад (Ф) болно. Өөрөөр хэлбэл:

$$1\text{Ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$$

Фарад нь амьдралд хэрэглэхэд тохиромжгүй асар том нэгж юм. Тухайлбал сүүлийн томьёонд Дэлхийн бөмбөрцгийн радиус  $R = 6400\text{км}$ -ыг тавиад багтаамжийг нь олбол  $C = 0.711 \cdot 10^{-3}\text{Ф}$  болно. Иймээс амьдралд микроФарад ( $1\text{мкФ} = 10^{-6}\text{Ф}$ ), пикоФарад ( $1\text{пФ} = 10^{-12}\text{Ф}$ ) мэт нэгжүүдийг хэрэглэдэг.

### 14.2.1 Конденсатор

Ганц дамжуулагчийн багтаамж нь өчүүхэн бага. Дэлхийн цахилгаан багтаамж дөнгөж 711мкФ болохыг өмнө бид тооцоолсон билээ. Харин хоёр буюу хэд хэдэн дамжуулагчийг хооронд нь ойртуулахад цахилгаан багтаамж нь их болдог. Энэ үзэгдэл дээр үндэслэн бүтээсэн цахилгаан төхөөрөмжийг конденсатор гэнэ. Цэнэглэгдсэн дамжуулагчийн ойролцоо хоёр дахь дамжуулагчийг ойртуулахад түүнд индукцийн цэнэг үүснэ. Хоёр дахь дамжуулагчийн нэгдүгээр дамжуулагчтай ойролцоо байгаа хэсэгт индукцээр үүссэн цэнэг нь нэгдүгээр дамжуулагчийн цэнэгийн эсрэг тэмдэгтэй цэнэг байна.<sup>3</sup> Үүний улмаас потенциал буурна. 14.5 томьёог харвал потенциал буурч байгаа тул багтаамж ихсэх нь харагдаж байна. Конденсаторыг ихэвчлэн хоёр дамжуулагчаар хийдэг. Энэ хоёр дамжуулагчийг хавтгай хэлбэртэй хийх тул конденсаторын хавтас гэж нэрлэнэ. Заримдаа нэг тэнхлэг дээр байрлах хоёр конденсатор, эсвэл нэг төвтэй хоёр бөмбөлөг байдлаар хийх нь бий. Тэдгээрийг харгалзан хавтгай, цилиндр болон бөмбөлөг конденсатор гэж нэрлэдэг.

Конденсатор доторх цахилгаан орны хүчлэгийн шугам нэг хавтаснаас гарч нөгөө дээр нь төгсдөг. Өөрөөр хэлбэл цэнэгтэй конденсаторын хоёр хавтас нь хэмжээгээрээ ижил боловч тэмдгээрээ эсрэг цэнэгтэй. Конденсаторын хавтасны цэнэгийг хоёр хавтасны хоорондын потенциалын ялгаварт хуваасан харьцааг конденсаторын багтаамж гэнэ.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (14.8)$$

<sup>2</sup>Ихэвчлэн “багтаамж” гэж товчилдог.

<sup>3</sup>Харин нэгдүгээр дамжуулагчаас алслагдсан хэсэгт нь нэгдүгээр дамжуулагчийн цэнэгтэй ижил тэмдэгтэй цэнэг индукцээр үүснэ.



Эндээс конденсаторын багтаамж нь мөн л Фарад нэгжээр илэрхийлэгдэх нь харагдаж байна. Конденсаторын багтаамж нь хавтасны хэлбэр хэмжээ, хоорондын зай болон орчны диэлектрик нэвтрүүлэлтээс хамаарна.

Жишээ болгож хавтгай конденсаторын багтаамжийг олъё. Конденсаторын хавтасны талбай  $S$ , цэнэг нь  $q$ , хавтас хоорондын материалын харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэлт нь  $\varepsilon$  байг. Ингэвэл хавтас хоорондын цахилгаан орны хүчлэг нь:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S}$$

Хавтас хоорондын потенциалын ялгавар нь

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon S}$$

Энд  $d$  нь хавтас хоорондын зай юм.

Сүүлийн томъёоноос хавтгай конденсаторын багтаамж нь:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (14.9)$$

болно.

Одоо цилиндр конденсаторын багтаамжийг олъё. Цилиндрин өндөр нь  $l$  байг. ?? томъёонд  $\lambda = q/l$  гэж орлуулж тавивал хавтас хоорондын хүчлэг нь тэнхлэг хүртэлх зайнаас

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon} \frac{q}{lr}$$

хамааралтай байна.

Хавтас хоорондын потенциалын ялгавар нь:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E(r) dr = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

Энд  $R_1$  ба  $R_2$  нь дотоод ба гадаад хавтасны радиус. Конденсаторын цэнэг  $q$ -г бодож олсон потенциалын ялгаварт харьцуулбал багтаамж нь гарна.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (14.10)$$

Хэрэв хавтас хоорондын зай нь бага бөгөөд  $d = R_2 - R_1 \ll R_1$  нөхцөлийг хангаж байвал

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \ln \left( 1 + \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right) \approx \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{d}{R_1}$$

Цилиндрин гадаргуугийн талбай нь  $S = 2\pi R_1 l$  болно. Эдгээрийг 14.10 томъёонд орлуулбал:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\frac{d}{R_1}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$

болно. Энэ нь хавтгай конденсаторын багтаамжтай адилхан байна.

Одоо бөмбөлөг конденсаторын багтаамжийг олъё. Цэнэгтэй хоёр бөмбөлгийн хооронд цахилгаан орны хүчлэг нь:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \frac{q}{r^2}$$



Үүнийг интегралчлан хоёр хавтасны хоорондын потенциалыг олбол:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E(r) dr = \frac{q}{\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2}$$

болно. Үүнийг ашиглан бөмбөлөг конденсаторын багтаамжийг олбол:

$$C = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (14.11)$$

Хоёр хавтасны хоорондын зай нь бөмбөлгүүдийн радиусаас олон дахин бага бол, ө.х.  $d = R_2 - R_1 \ll R_1$  бол бөмбөлөг конденсаторын багтаамжийг олох томъёо нь хавтгай конденсаторын багтаамжийн томъёотой адилхан болно. Учир нь 14.11 томъёоны  $4\pi R_1 R_2$  үржвэр нь хавтаснуудын талбай болох бөгөөд  $d = R_2 - R_1$  нь хавтас хоорондын зай юм. Тиймээс 14.11 томъёо нь 14.9 хэлбэрт шилжиж байна.

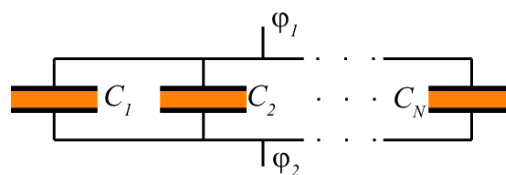
Конденсаторын багтаамжийг нэмэгдүүлэхийн тулд хавтасны талбайг ихэсгэх, хавтас хоорондын зайг багасгахаас гадна хавтас хооронд диэлектрик нэвтрүүлэлт ихтэй материал хийж болох нь багтаамж олох томъёонуудаас харагдаж байна. Конденсатор бүрд тэсвэрлэх хүчдэлийн дээд хэмжээ бий. Үүнээс дээш хүчдэл өгвөл хавтаснуудын хоорондын тусгаарлагч нэвт цохигддог.

## 14.2.2 Конденсаторуудын холболт

Өөрт байгаа конденсаторуудыг ашиглаад шаардлагатай багтаамжийг гарган авахын тулд конденсаторуудыг янз бүрээр холбодог. Олон конденсаторуудыг янз бүрээр холбож болох боловч холболтыг ерөнхийд нь зэрэгцээ болон цуваа холболт гэж ангилж болно.

### Зэрэгцээ холболт

14.4-р зурагт зэрэгцээ холбогдсон конденсаторуудыг харуулжээ. Тэдгээрийн нэг талын хавтас нь бүгд  $\varphi_1$  потенциалтай, нөгөө талын хавтас нь бүгд  $\varphi_2$  потенциалтай.



Зураг 14.4. Зэрэгцээ холбогдсон конденсаторууд.

Иймээс нийт цэнэг нь конденсатор тус бүр дээрх цэнэгийн нийлбэртэй тэнцүү.

$$q = \sum q_k = \sum C_k (\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2) \sum C_k$$

Харин багтаамж нь  $C = q/(\varphi_1 - \varphi_2)$  тул

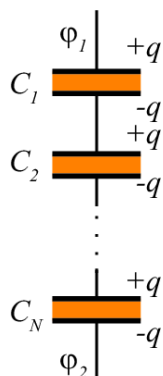
$$C = \sum C_k \quad (14.12)$$

Эндээс харвал зэрэгцээ холбогдсон конденсаторуудын системийн багтаамж нь конденсатор тус бүрийн багтаамжуудын нийлбэртэй тэнцүү байна.



## Цуваа холболт

Нэг конденсаторын төгсөлд нөгөө конденсаторын эхлэлийг холбох гэх мэтээр цувуулан холбохыг цуваа холболт гэдэг билээ. 14.5-р зурагт цуваа холбогдсон конденсаторуудыг үзүүлэв. Конденсаторууд цэнэглэгдэх процессыг тодорхой тайлбарлахын тулд дээд талд байгаа хавтсыг нь нэгдүгээр, доод талд байгаа хавтсыг нь хоёрдугаар хавтас гэе.



Зураг 14.5. Цуваа холбогдсон конденсаторууд.

Эхний конденсаторын нэгдүгээр хавтас болон сүүлчийн конденсаторын хоёрдугаар хавтасны хооронд потенциалын ялгавар өгье. Ингэхэд нэгдүгээр конденсаторын 1-р хавтас  $q$  цэнэгтэй болж, түүний хоёрдугаар хавтас нь индукцээр  $-q$  цэнэгтэй болно. Гэх мэтчилэн сүүлийн конденсаторын хоёрдугаар хавтаснаас бусад бүх хавтаснууд индукцээр цэнэгтэй болно. Иймээс конденсатор бүр дээрх хүчдэл нь

$$U_k = \frac{q}{C_k} \quad (14.13)$$

Конденсатор бүр дээр унаж байгаа хүчдэлүүдийн нийлбэр нь конденсаторын батареид өгсөн потенциалын ялгавартай тэнцүү юм:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \sum U_k = \sum \frac{q}{C_k} = q \sum \frac{1}{C_k}$$

Эндээс багтаамжийн урвууг олбол:

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_k} \quad (14.14)$$

Цуваа холбогдсон конденсаторуудын батарейн багтаамжийн урвуу нь конденсатор бүрийн багтаамжийн урвуугийн нийлбэртэй тэнцүү байдаг ажээ. Конденсаторуудыг ингэж холбохдоо аль нэг конденсаторынх нь хүчдэл  $U_k$  нь тэсвэрлэх хүчдэл  $U_{max}$ -аас хэтрэхгүй байх ёстойг анхаараарай.

## 14.3 Цахилгаан орны энерги ба энергийн нягт

Цэнэгтэй биетүүдийн харилцан үйлчлэлийн хүч нь консерватив, өөрөөр хэлбэл энэ хүчний үйлчлэл дор цэнэгүүдийг шилжүүлэхэд хийсэн ажил нь замын хэлбэрээс хамаарадаггүй билээ. Иймээс цэнэгтэй биетүүдийн систем нь потенциал энергитэй байдаг. Хоёр эерэг цэгэн цэнэгээс тогтох системийн потенциал энергийг олъё. Энэ хоёр цэнэгийг хязгааргүй хол зайнаас зөөн авчирч цэнэгийн системийг үүсгэсэн гэе. Цэнэгүүд хязгааргүй



хол байхад тэдгээрийн харилцан үйлчлэлийн потенциал энерги нь тэг байна. Цэнэгүүдийг  $r_{12}$  зайтай болтол ойртуулсан байг. Ойртуулах явцад цэнэгүүд түлхэлцэх тул цахилгаан хүчний эсрэг ажил хийнэ. Энэ ажил нь системийн потенциал энерги болно.  $q_1$  цэнэгийг нь  $q_2$  цэнэгийн үүсгэсэн цахилгаан оронд зөөн түүнээс  $r_{12}$  зайд авч ирэхэд

$$A_1 = q_1\varphi_1 = q_1 \frac{1}{\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_2}{r_{12}} \quad (14.15)$$

хэмжээтэй ажил хийнэ. Энд  $\varphi_1$  нь  $q_2$  цэнэгийн  $\vec{r}_{12}$  цэгт үүсгэх потенциал юм.

Одоо  $q_2$  цэнэгийг хязгааргүй холоос зөөн  $q_1$  цэнэгээс  $r_{12}$  зайд авчирсан гээ. Ингэхэд гаднын хүчний гүйцэтгэх ажил нь

$$A_2 = q_2\varphi_2 = q_2\varphi_2 = q_1 \frac{1}{\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1}{r_{12}} \quad (14.16)$$

$A_1$  ба  $A_2$  ажлууд тэнцүү бөгөөд системийн потенциал энергитэй мөн тэнцүү юм.

$$W = q_1\varphi_1 = q_2\varphi_2$$

Системийн потенциал энергийг бичихдээ хоёр цэнэгийг тэгш хэмтэйгээр оролцуулж бичвэл тохиромжтой.

$$W = \frac{1}{2}(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2) \quad (14.17)$$

Одоо гурван цэнэг бүхий системийн энергийг олж. Хязгааргүй хол байсан  $q_3$  цэнэгийг өмнөх хоёр цэнэг бүхий системд авчирж  $q_1$  цэнэгээс  $r_{13}$  зайд,  $q_2$  цэнэгээс  $r_{23}$  зайд байрлуулъя. Цэнэгийг зөөхөд хийх ажил нь:

$$A_3 = q_3\varphi_3 = q_3 \frac{1}{\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{q_1}{r_{13}} + \frac{q_2}{r_{23}} \right)$$

Гурван цэнэгийн системийн потенциал энерги нь

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1q_2}{r_{12}} + q_3 \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{q_1}{r_{13}} + \frac{q_2}{r_{23}} \right)$$

Энэ илэрхийлэл нь

$$W = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left[ q_1 \left( \frac{q_2}{r_{12}} + \frac{q_3}{r_{13}} \right) + q_2 \left( \frac{q_1}{r_{12}} + \frac{q_3}{r_{23}} \right) + q_3 \left( \frac{q_1}{r_{13}} + \frac{q_2}{r_{23}} \right) \right]$$

$$W = \frac{1}{2}(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2 + q_3\varphi_3)$$

Энд  $\varphi_1$  нь  $q_2$  ба  $q_3$  цэнэгүүдийн  $q_1$  цэнэг байгаа цэг дээр үүсгэж байгаа потенциал юм.  $N$  ширхэг цэнэгээс тогтох системийн потенциал энерги нь

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i\varphi_i \quad (14.18)$$

гэж илэрхийлэгдэх нь харагдаж байна.





### 14.3.1 Цэнэгтэй дамжуулагчийн энерги

$q_0$  цэнэгтэй дамжуулагчийн энергийг олъё.  $q_0$  цэнэгийг өчүүхэн жаахан хэмжээтэй цэнэгүүдийн нийлбэр гэж үзэж болно. Олон цэнэгээс тогтох систем потенциал энергитэй байдаг талаар өмнөх сэдэвт үзсэн билээ. Дамжуулагчийг цэнэглэхдээ хязгааргүй холоос цэнэгүүдийг бага багаар зөөн авчирж цэнэглэсэн гэж үзэж болно. Дамжуулагчийг цэнэглэсээр  $q$  цэнэгтэй болсон байхад нь  $dq$  хэмжээний цэнэгийг хязгааргүй холоос авч ирэхэд хийгдэх ажил  $dA$ -г олъё. Энэ ажилтай тэнцүү хэмжээгээр потенциал энерги нь нэмэгдэнэ.

$$dA = dW = \varphi dq = \frac{q}{C} dq$$

Дээрх илэрхийллийг интегралчлан нийт потенциал энергийг олбол:

$$W = \int_0^{q_0} \frac{q}{C} dq = \frac{q^2}{2C}$$

$q = C\varphi$ -ийг ашиглаад дээрх илэрхийллийг

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2} \quad (14.19)$$

гэж бичиж болно.

### 14.3.2 Цэнэгтэй конденсаторын энерги

Конденсаторын хавтаснуудыг  $+q$  ба  $-q$ -р цэнэглэх процессыг дараах байдлаар ойлгож болно. Конденсаторын нэг хавтаснаас нь  $dq$  хэмжээний цэнэг авч нөгөө хавтаст өгье. Ингэхэд  $dA = dq(\varphi_1 - \varphi_2) = dqU$  хэмжээний ажил хийнэ.  $U$  нь конденсаторт өгсөн хүчдэл. Хийсэн ажлын хэмжээгээр конденсаторт хадгалагдаж буй энерги нэмэгдэх тул

$$dW = dA = U dq = \frac{q}{C} dq$$

Сүүлийн илэрхийллийг интегралчлан конденсаторын энергийг олбол:

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} \quad (14.20)$$

### 14.3.3 Цахилгаан орны энерги

Конденсаторын энергийг хавтаснуудын хооронд үүсэж байгаа цахилгаан орноор илэрхийлж болно. Хялбар тул хавтгай конденсаторыг авч үзье. 14.20 илэрхийлэлд 14.9-аас багтаамжийг олж тавивал:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \left( \frac{U}{d} \right)^2 Sd$$

Хавтас хоорондын орон зайн эзлэхүүн нь  $V = Sd$  тул

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V \quad (14.21)$$

Энэ илэрхийлэл нь конденсаторын энергийг хавтас хоорондын орон зайд үүссэн цахилгаан орны хүчлэгээр нь илэрхийлж байна. Хэрэв цахилгаан орон нэгэн төрөл байвал



хавтас хоорондын орон зайд энергийн нягт жигдхэн байна. Сүүлийн илэрхийллээс энергийн нягтыг олбол:

$$\omega = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} \quad (14.22)$$

Цахилгаан орны шилжилтийн вектор нь  $D = \varepsilon_0 \varepsilon E$  байдаг тул

$$W = \frac{ED}{2} \quad (14.23)$$

эсвэл

$$W = \frac{D^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon} \quad (14.24)$$

болно.

Изотроп диэлектрикийн хувьд  $\vec{D}$  ба  $\vec{E}$ -ийн чиглэл давхцдаг. Иймээс 14.23 томьёог

$$\omega = \frac{\vec{E}\vec{D}}{2}$$

хэлбэртэй бичиж болно.

## 14.4 Диэлектрикийн туйлшрал

### 14.4.1 Туйлт ба туйлгүй молекулууд

Хэрэв диэлектрикийг цахилгаан оронд оруулбал диэлектрик болон цахилгаан орны аль аль нь өөрчлөгддөг. Энэ үзэгдэл нь бүр атомын бүтэцтэй холбоотой. Атом нь эерэг цэнэгтэй цөм, түүний гадуур бүрхэн байрлах сөрөг цэнэгтэй электронуудаас бүтдэг. Электроны цөмтэй харьцангуй байрлал нь тасралтгүй өөрчлөгддөг. Гаднын цахилгаан орны нөлөөгөөр электроны байршлын дундаж нь өөрчлөгдөж болно. Атом молекулын хэмжээтэй харьцуулахад хол зайнаас авч үзэж байгаа тохиолдолд цөм болон электронуудыг нь тус тусдаа нэг цэг дээр төвлөрсөн эерэг болон сөрөг цэгэн цэнэг гэж ойролцоогоор төсөөлж болно.

Эерэг цэнэгийн төв нь

$$\vec{r}^+ = \frac{\sum q_i^+ \vec{r}_i^+}{\sum q_i^+} = \frac{\sum q_i^+ \vec{r}_i^+}{q} \quad (14.25)$$

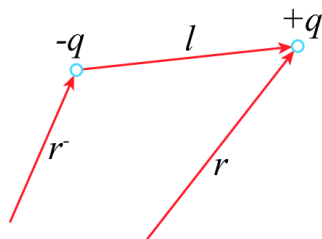
радиус вектороор тодорхойлогдоно. Энд  $\vec{r}_i^+$  нь  $i$ -р эерэг цэнэгийн радиус вектор,  $q$  нь молекулын эерэг цэнэгийн нийлбэр. Үүнтэй төсөөтэйгөөр сөрөг цэнэгийн төвийн радиус вектор нь:

$$\vec{r}^- = \frac{\sum q_i^- \vec{r}_i^-}{\sum q_i^-} = \frac{\sum q_i^- \vec{r}_i^-}{-q} \quad (14.26)$$

Энд  $\vec{r}_i^-$  нь  $i$ -р сөрөг цэнэгийн хугацаагаар дундчилсан радиус вектор.

Гаднын цахилгаан оронгүй байхад эерэг болон сөрөг цэнэгийн төв давхцаж ч болно, давхцахгүй ч байж болно. Эерэг сөрөг цэнэгийн төв нь давхцаагүй молекулыг *туйлт молекул* гэх бөгөөд диполь гэж ойролцоолон үзэж болно. Туйлт молекул нь хувийн цахилгаан моменттой байна. 14.25 ба 14.26 томьёог ашиглаад диполийн моментыг олбол:

$$\vec{p} = q\vec{l} = q(\vec{r}^+ - \vec{r}^-) = \sum q_i^+ \vec{r}_i^+ + \sum q_i^- \vec{r}_i^-$$



Зураг 14.6. Диполь, түүний цэнэгийн төвийн радиус вектор.  $\vec{l}$  нь сөрөг цэнэгээс эерэг цэнэг рүү татсан вектор,  $\vec{r}^-$  ба  $\vec{r}^+$  нь тооллын эхээс эерэг сөрөг цэнэгүүд рүү татсан радиус векторууд юм.

Эерэг болон сөрөг цэнэгүүдийг тусад нь биш, харин хамтад нь дугаарлавал диполийн момент нь:

$$\vec{p} = \sum q_k \vec{r}_k \quad (14.27)$$

Цахилгаан саармаг цэнэгийн системийн хувьд радиус вектор  $\vec{r}_k$ -ийг хаанаас эхлэн тоолсноос  $\vec{p}$ -ийн утга хамаарахгүй.

Гаднын цахилгаан орон байхгүй тохиолдолд эерэг болон сөрөг цэнэгийн төв нь давхацдаг молекул нь хувийн цахилгаан моментгүй. Ийм молекулыг *туйлгүй* молекул гэдэг. Гэхдээ туйлгүй молекулыг гаднын цахилгаан оронд оруулахад эерэг цэнэгийн төв нь гаднын цахилгаан орны хүчлэгийн шугамын дагуу, сөрөг цэнэг нь түүний эсрэг зүгт шилжиж цахилгаан моменттой болно. Цахилгаан моментын хэмжээ нь гаднын цахилгаан орны хүчлэгтэй шууд хамааралтай тул

$$\vec{p} = \beta \epsilon_0 \vec{E} \quad (14.28)$$

гэж бичиж болно.  $\beta$ -г молекулын туйлшрах чадвар гэдэг. Цахилгаан орны хүчлэг нэмэгдэх тутам диполийн момент ихэснэ, өөрөөр хэлбэл эерэг болон сөрөг цэнэгүүдийн төвийн хоорондын зай их болно гэсэн үг. Яг л уян харимхай пүршинд холбосон үрлүүд мэт байна. Иймээс гаднын цахилгаан оронд байгаа туйлгүй молекул нь уян диполь мэт байна.

Гаднын цахилгаан оронд байгаа туйлт молекул нь эргэлдэж, цахилгаан орны дагуу байршилтай болдог. Иймээс диполийн момент нь өөрчлөгдөхгүй, хатуу диполь мэт байна.

#### 14.4.2 Нэгэн төрлийн цахилгаан орон дахь диполь

Диполийг гаднын цахилгаан оронд оруулахад түүний цэнэгүүдэд эсрэг зүгт Кулоны хүч үйлчилнэ. Эргүүлэх хүчний мөр нь цахилгаан оронд ямар чиглэлтэй байгаагаас хамаарна. 14.7-р зургийг харна уу. Хүчнүүдийн хэмжээ нь  $qE$  тул хос хүчний диполийг эргүүлэх момент нь

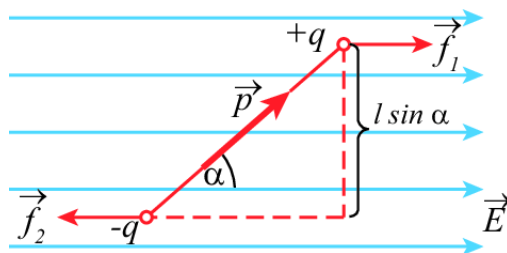
$$M = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha$$

Дээрх томъёог

$$\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{E}] \quad (14.29)$$

гэж вектор хэлбэрээр бичиж болно.  $\vec{M}$  хүчний момент нь  $\vec{p}$  диполийг  $\vec{E}$ -ийн дагуу чиглэлтэй болгоно.  $\vec{p}$  ба  $\vec{E}$  векторуудын хоорондын өнцгийг  $d\alpha$  хэмжээгээр нэмэгдүүлэхэд

$$dA = M d\alpha = pE \sin \alpha d\alpha$$



Зураг 14.7. Нэгэн төрлийн цахилгаан оронд байгаа диполь. Түүний эерэг цэнэгт нь цахилгаан орны хүчлэгийн дагуу чиглэсэн  $\vec{f}_1$  хүч, сөрөг цэнэгт нь эсрэг чиглэсэн  $\vec{f}_2$  хүч үйлчилнэ.

хэмжээний ажил хийх шаардлагатай. Энэ ажил нь цахилгаан оронд байгаа диполийн потенциал энергийг  $dW$  хэмжээгээр нэмэгдүүлнэ.

$$dW = pE \sin \alpha d\alpha \quad (14.30)$$

14.30-ийг интегралчлахад цахилгаан орон дахь диполийн энерги нь

$$W = -pE \cos \alpha + \text{const}$$

болно.  $\text{const} = 0$  гэвэл:

$$W = -pE \cos \alpha = -\vec{p}\vec{E} \quad (14.31)$$

### 14.4.3 Диэлектрикийн туйлшрал

Гаднын цахилгаан орон байхгүй үед диэлектрикийн туйлгүй молекулын диполийн момент нь тэг байна. Харин туйлт молекулуудын диполиуд нь эмх замбараагүй байрласан байна. Аль ч тохиолдолд диполийн моментын нийлбэр нь тэг байна. Гаднын цахилгаан орны нөлөөгөөр диэлектрик туйлширдаг. Өөрөөр хэлбэл нийлбэр цахилгаан диполийн нийлбэр нь тэгээс ялгаатай болно. Диэлектрикийн туйлшралыг хэмжихийн тулд нэгж эзлэхүүн дахь нийлбэр диполийн момент буюу *туйлшралын вектор* хэмээх хэмжигдэхүүнийг хэрэглэнэ.

Диэлектрикийн  $\Delta V$  эзлэхүүн дахь нийлбэр диполийн момент нь  $\sum_{\Delta V} \vec{p}_i$  бол диэлектрикийн туйлшралын вектор нь

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V} \quad (14.32)$$

болно. Диполийн момент нь СИ системд Кл·м нэгжтэй, харин дээрх томьёоноос харвал диэлектрикийн туйлшралын вектор нь Кл/м<sup>2</sup> нэгжтэй байна. Өөрөөр хэлбэл  $\epsilon_0 \vec{E}$ -тэй адил нэгжтэй байна.

Сегнетоэлектрикээс бусад диэлектрикийн хувьд туйлшралын вектор нь гаднын цахилгаан оронтой дараах хамааралтай:

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (14.33)$$

Энд байгаа  $\chi$  нь *диэлектрик мэдрэх чадвар* бөгөөд цахилгаан орноос хамаардаггүй, зөвхөн диэлектрикийн төрлөөс л хамаарна. Дээрх томьёо нь зөвхөн изотроп диэлектрикийн хувьд тохирох бөгөөд анизотроп диэлектрикийн хувьд  $P$  ба  $E$ -ийн чиглэл давхцахгүй.  $\vec{P}$  болон  $\epsilon_0 \vec{E}$  ижил нэгжтэй тул диэлектрик мэдрэх чадвар  $\chi$  нь нэгжгүй болох нь харагдаж байна.

Туйлгүй молекулын хувьд 14.33 томъёог дараах байдлаар хялбархан гаргаж болно. Диэлектрикийн нэгж эзлэхүүн дахь диполийн тоог  $n$  гэвэл  $\Delta V$  эзлэхүүн дахь диполийн тоо нь  $\Delta N = n\Delta V$  болно.

Үүнийг ашиглаад  $\Delta V$  эзлэхүүн дэх диполийн моментыг нийлбэр нь

$$\sum_{\Delta V} \vec{p}_i = \Delta N \vec{p}$$

буюу  $\vec{p} = \beta \epsilon_0 E$  болохыг орлуулбал:

$$\sum_{\Delta V} \vec{p}_i = n \Delta V \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

Сүүлийн илэрхийллээс туйлшралын векторыг олбол:

$$\vec{P} = n \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

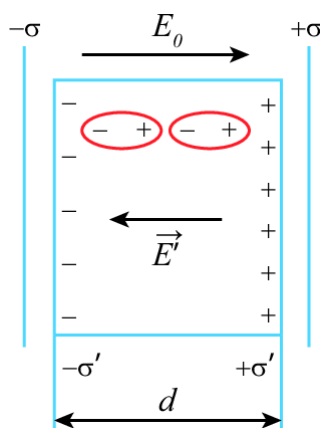
Эндээс харвал диэлектрик мэдрэх чадвар нь:

$$\chi = n\beta \quad (14.34)$$

Харин гаднын цахилгаан орон дахь диэлектрикийн молекулууд нь цахилгаан орны дагуу байрлах боловч дулааны хөдөлгөөний улмаас бүрэн цэгцэрч чаддаггүй. Гэхдээ гаднын цахилгаан орон их болох тутам цэгцрэх нь нэмэгдэх тул туйлшралын вектор нь мөн л 14.33 хэлбэртэй байна.

#### 14.4.4 Диэлектрик дахь цахилгаан орон

Эсрэг цэнэгтэй хоёр хавтгайн хооронд байгаа<sup>4</sup> диэлектрикийг авч үзье. Хавтаснуудын үүсгэх цахилгаан орны хүчлэгийг гаднын цахилгаан орон гэж нэрлээд  $\vec{E}_0$  гэж тэмдэглэе.



Зураг 14.8. Параллель хоёр хавтгайн хооронд үүссэн төрлийн цахилгаан оронд байгаа диэлектрик. (Хавтас хоорондын зай нь  $d$ , хавтаснуудын гадаргуугийн цэнэгийн нягт нь  $\sigma$  болно.)

Цахилгаан орны нөлөөгөөр түүний доторх диполиуд эмх цэгцтэй болж эерэг болон сөрөг хавтас руу харсан диэлектрикийн хоёр тал нь гадаргуугийн цэнэгтэй болно. 14.8-р зургийг харна уу. Сөрөг цэнэгтэй хавтас руу харж байгаа диэлектрикийн гадаргуу нь  $+\sigma'$  цэнэгийн нягттай, сөрөг цэнэгтэй хавтас руу харж байгаа нь  $-\sigma'$  цэнэгийн нягттай

<sup>4</sup>Конденсаторын хоёр хавтасны хооронд байгаа диэлектрик нь үүний жишээ болно.



болно. Эдгээр цэнэгтэй гадаргуу нь  $\vec{E}'$  хүчлэгтэй цахилгаан орон үүсгэнэ. Диэлектрик дахь цахилгаан орон нь энэ цахилгаан орон болон гаднын цахилгаан орны нийлбэрээр тодорхойлогдоно.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

буюу

$$E = E_0 - E' \quad (14.35)$$

$E'$  нь диэлектрикийн гадаргуугийн цэнэгийн нягтаар  $E' = \sigma'/\varepsilon_0$  гэж илэрхийлэгдэнэ (14.3 томьёог харна уу).

$$E = E_0 - \sigma'/\varepsilon_0 \quad (14.36)$$

$\sigma'$  нягттай гадаргуугийн цэнэг нь туйлшралын улмаас үүссэн билээ. Туйлшрал их байх тутам гадаргуугийн цэнэг их байх нь мэдээж. Одоо туйлшралын вектор  $\vec{P}$  болон гадаргуугийн цэнэгийн нягтын хамаарлыг олъя.

Үүний тулд эхлээд хос хавтгайн хооронд байгаа диэлектрикийн нийт диполийн моментыг олно. Нэгж эзлэхүүн дахь диполийн момент буюу туйлшралын векторыг эзлэхүүнээр нь үржүүлбэл нийт диполийн момент болно.

$$\sum p_i = P \cdot V = PSd$$

Энд байгаа  $S$  нь конденсаторын хавтасны талбай юм.

Нөгөө талаас диэлектрикийн хоёр талд ялгарсан эерэг болон сөрөг цэнэг нь хоорондоо  $d$  зайтай хос цэнэгийн систем буюу нэгэн том диполь болно. Энэ диполийн момент нь

$$p = q \cdot d = \sigma' Sd$$

Сүүлийн хоёр илэрхийллийн баруун гар талыг тэнцүүлбэл:

$$\sigma' Sd = PSd$$

буюу

$$\sigma' = P \quad (14.37)$$

14.36 тэгшитгэлийн гадаргуугийн цэнэгийн нягтыг туйлшралын вектороор орлуулан бичвэл:

$$E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0}$$

Энэ тэгшитгэлд  $P = \chi \varepsilon_0 E$  болохыг орлуулбал

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi}$$

болно. Диэлектрик доторх цахилгаан орон  $E = E_0/\varepsilon$  байдаг тул

$$\varepsilon = 1 + \chi \quad (14.38)$$

болж байна. Энэ илэрхийлэл нь диэлектрикийн чухал шинж чанарууд болох харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэлт болон диэлектрик мэдрэх чадварын холбоог тогтоож байна.



## 14.5 Сегнетоэлектрик ба пьезоэлектрик

### 14.5.1 Сегнетоцахилгаан үзэгдэл

Температурын тодорхой мужид өөрөө туйлширдаг диэлектрик материалыг сегнетоэлектрик гэдэг. Туйлшрал нь гаднын үйлчлэлээр өөрчлөгдөж болдог. Сегнетоцахилгаан үзэгдлийг анх сегнетийн давснаас ( $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ ) илрүүлжээ. Үүний дараа калийн ди-гидрофосфатаас ( $KH_2PO_4$ ) илрүүлсэн байна.

Одоогоор хэдэн зуу гаруй сегнетоэлектрикүүдийг илрүүлээд байна. Спонтан туйлшралтай, өөрөөр хэлбэл гаднын цахилгаан орон үгүй байхад цахилгаан диполийн момент  $\vec{P}$ -той байдаг нь пироэлектрикүүдээс ялгарах ялгаа болно.

Сегнетоэлектрикийн туйлшрал нь нэгэн төрөл биш, туйлшралын чиг нь янз бүр байх доменуудаас тогтдог. Доменуудын нийлбэр цахилгаан диполийн момент нь тэг байна. Чөлөөт энергийн утга нь хамгийн бага байх доменуудын тогтоц нь хамгийн тогтвортой байна. Идеал кристаллд энэ тэнцвэржилт нь домен үүсэхэд кристалл хоорондын хэсгүүдийн электростатик үйлчлэлийн улмаас энерги хорогдох болон домены хилүүдийн энергийн өсөлтийн тэнцвэржилтээр тодорхойлогдоно.

Бодит кристаллд түүн дахь согогийн тархалт, тэдгээрийн шинж чанараар доменуудын бүтэц, тогтоц тодорхойлогдоно. Янз бүрийн доменуудын тоо, тэдгээрийн спонтан туйлшралын харилцан байршилт нь кристаллын симметрээс хамаардаг.

Сегнетоэлектрикийг гаднын цахилгаан оронд оруулахад домены хилүүд нь өөрчлөгдөн нэгдэж туйлшрал нь гаднын цахилгаан орны эсрэг чиглэдэг. Бодит кристаллд домены хилүүд нь ихэвчлэн кристалл дахь согог, ялгаатай хэсгүүдийн заагаар тодорхойлогддог.

Цахилгаан оронд оруулахад энэ хил нь өөрчлөгдөнө. Хүчтэй цахилгаан оронд оруулбал доменууд нэгдэж нэг домен болно. Цахилгаан орноос гаргасны дараа ч гэсэн түүний нөлөөгөөр тогтсон туйлшрал нь нэлээд урт хугацааны туршид хадгалагдсаар байх болно. Сегнетоэлектрикт гаднын цахилгаан оронтой тэнцүү хэмжээтэй, эсрэг чиглэлтэй цахилгаан орон үүсгэхийн тулд гаднын цахилгаан орны хэмжээ нь хангалттай их байх хэрэгтэй. Туйлшрал  $\vec{P}$ -ийн гаднын цахилгаан орон  $\vec{E}$ -ээс хамаарах хамаарал нь шугаман биш, гистерезисийн гогцоо хэлбэртэй байна.

Цахилгаан орноор олон домент сегнетоэлектрикт материалын домены хилийг өөрчлөн туйлшралыг огцом өөрчлөхөд диэлектрик нэвтрүүлэлт нь тун их болно. Гаднын цахилгаан орны хэмжээнээс диэлектрик нэвтрүүлэлт нь тун их хамаардаг.

Туйлын фаздаа байгаа сегнетоэлектрикүүд бүгд пьезоэлектрик болно. Учир нь  $\epsilon$  их байгаагаас пьезоэлектрик тогтмол нь их болно. Туйлшрал нь температураас их хамаарах тул пироэлектрик тогтмол нь ч мөн их байна.

### 14.5.2 Пьезоэлектрикүүд

Шахах болон сунгахад тодорхой чигийн дагуу цахилгаан туйлшрал үүсгэдэг кристалл бодисуудыг нийтэд нь пьезоэлектрик гэж нэрлэдэг. Гаднын цахилгаан оронгүй үед ч энэ үзэгдэл ажиглагдах ба энэ үзэгдлийг шууд пьезо үзэгдэл гэдэг. Харин цахилгаан орны нөлөөгөөр деформацид орохыг нь урвуу пьезоцахилгаан үзэгдэл гэнэ. Аль ч тохиолдолд цахилгаан орны хүчлэг ба механик үйлчлэлийн хамаарлууд шугаман шинж чанартай. Үүгээрээ электрострикцээс ялгаатай.

Электрострикцийн хувьд деформацийн хэмжээ нь цахилгаан орны хүчлэгийн квадраттай шууд хамааралтай байдаг. Пьезо үзэгдлийг анх 1880 онд ах дүү Кюри нар боломжын кристалл дээр ажиглажээ. Одоогоор пьезоэлектрик шинж чанартай 1500 гаруй материал мэдэгдэж байгаа.



Пьезоэлектрик үзэгдлийг ажиглахын тулд кристаллын талууд дээр металл хавтгайнууд тогтооно. Хэрэв хавтгайнуудыг битүү холбоогүй бол деформацилах үед тэдгээрийн хооронд потенциалын зөрүү үүснэ. Харин хавтгайнуудыг дамжуулагчаар холбовол туйлшралын цэнэгийн хэмжээтэй тэнцүү гүйдэл дамжуулагчаар гүйнэ.

Хэрэв хавтгайнуудад гаднын цахилгаан хөдөлгөгч хүчний үүсгүүр залгавал пьезоэлектрик деформацид орох болно. Пьезо үзэгдлийн механизмыг болрын кристаллын жишээн дээр тайлбарлая. Эгэл үүр нь  $SiO_2$ -ийн гурван молекулоос тогтоно.  $X_1$  тэнхлэгийн дагуу шахахад эерэг цэнэгтэй ион  $1(Si^{+})$  ба сөрөг цэнэгтэй ион  $2(O^{-})$  эгэл үүрийн гүн уруу дөхөж ирнэ. Үүний дүнд А ба В хавтгай цэнэгжинэ. Харин  $X_1$  тэнхлэгийн дагуу татвал цэнэгийн тэмдэг нь эсрэгээс солигдоно. Пьезо үзэгдэл нь кристаллын төвийн тэгш хэмийн тэнхлэгийг агуулаагүй кристалл дээр л ажиглагдана.

Харин бусад тэгш хэмийн тэнхлэг оролцсон байвал деформацийн үед зарим чиглэлийн дагууд туйлшрал үүсэхгүй. Өөрөөр хэлбэл пьезоэлектрикийн кристаллуудын тоог хязгаарладаг гэсэн үг. Пьезоэлектрик үзэгдлийг тоогоор үнэлэхийн тулд пьезо тогтмол гэдэг хэмжигдэхүүнийг хэрэглэнэ. Пьезо тогтмол нь цахилгаан орны хүчлэг ба деформацийн хамаарлын пропорционалын коэффициент юм. Жишээлбэл пьезоэлектрикт  $\sigma$  хүчлэгийн нөлөөгөөр  $\vec{P}$  туйлшрал үүссэн байвал  $P = \sigma d$  гэж илэрхийлэгдэнэ.

Бүрэн туйлшрал нь механик хүчлэг болон цахилгаан орны нөлөөгөөр үүссэн туйлшралуудын нийлбэрээр тодорхойлогдоно.

$$P = \sigma d + \chi E$$

$\chi$  – диэлектрик мэдрэх чадвар,  $d$  – пьезо тогтмол.

Пьезо тогтмол нь чиглэл бүрийн хувьд өөр өөр байна. Нийтдээ нэг кристаллд 18 өөр пьезо тогтмол байна. Гэхдээ бүх пьезо тогтмолууд нь хоорондоо хамааралтай тул ганц пьезо тогтмол  $d$ -ээр нь хязгаарлаж болно.

Янз бүрийн кристаллуудын хувьд пьезо тогтмол нь өөр өөр байдаг. Пьезоэлектрик материалуудаар ихэвчлэн хувиргагч төхөөрөмж хийдэг. Пьезоэлектрик хувиргагчийг хэт авиан технологи, дефектоскоп, гидроакустик, радио нэвтрүүлэг, давтамж хэмжигч, электроник зэрэг маш олон салбарт хэрэглэнэ. Түүнчлэн акустоэлектроникт хүчтэй хэт авиан үүсгүүр, микрофон, резонатор гэх мэт олон төхөөрөмжид ашигладаг.