

Цахилгаан Шүүлтүүр Дотор Явагдах Титэмт Ниргэлгийн Хязгаарын Параметруудийг Тооцоолох нь

Ж.Ванчинхүү, П.Мөнхбаатар, Б.Бат-эрдэнэ, Ш.Мөнхжаргал
Физикийн тэнхим, ШУС, МУИС

Цахилгаан шүүлтүүрт явагдах титэмт ниргэлэг үүсэх болон стример шилжих нөхцөлийг судалж стационар титэмт ниргэлэг явагдаж байх хүчдэл, гүйдлийн хамгийн их ба хамгийн бага утгын хязгаарыг тооцоолов. Түүнчлэн иончлолын коэффициентийн орноос хамаарах хамаарал мэдэгдэж байгаа тохиолдолд титэмт ниргэлгийн асаах хүчдлийн утгыг онолын хувьд гаргах боломжтойг үзүүлж титэмт ниргэлгийн доторхи цахилгаан орон ба ионы түгэлт гаргав.

PACS number: 52.80.Hc, 47.57.-s

I. Оршил

Тодорхой хурдтай хөдөлж байгаа цэнэгтэй бөөмийг цахилгаан оронд оруулахад түүнд орны зүгээс Кулоны хүч үйлчилдэг. Энэ цэнэгийн хөдөлгөөний анхны чиглэл нь орны чиглэлээс ялгаатай байвал бөөм анхны чиглэлээс хазайн орны дагуу хөдөлдөг. Цахилгаан орон дотор хөдөлж байгаа цэнэгт бөөмийн хөдөлгөөний энэ чанарыг ашиглан дисперслэгдсэн жижиг хэсгүүд агуулсан орчныг жижиг хэсгүүдээс нь шүүж цэвэрлэдэг бөгөөд ийм системийг цахилгаан шүүлтүүр гэдэг [1-3]. Тоосны ширхэгүүд, микродуслууд болон бөөмцөр зэргийг агуулсан хий болон дисперслэгдсэн системийг шүүж цэвэрлэхэд ийм цахилгаан шүүлтүүрийг өргөн ашигладаг [4-6]. Шаталтаас ялгарах утаа нь шаталтын явцад үүсэх төрөл бүрийн хий болон хөө тортогийг бүрдүүлэгч харьцангуй том хэмжээтэй бөөмцрүүд (дисперслэгдсэн систем) агуулсан олон фазтай систем байдаг [7,8]. Ийм учраас утааг хөө тортогоос нь цэвэрлэхэд цахилгаан шүүлтүүрийг үр ашигтайгаар ашиглаж болно.

Цахилгаан шүүлтүүрийн шүүх чадвар нь хийн урсгалын хурд, бөөмцрийн хөндлөн чиглэлд хөдлөх дрейфийн хурднаас хүчтэй хамаардаг [1,4]. Харин дрейфийн хурдны хэмжээ нь шүүлтүүрийн доторхи цахилгаан орны түгэлт болон бөөмцрийн цэнэгийн хэмжээнээс хамаарч байдаг [2,3].

Утааны бөөмцрийн цахилгаан статик шүүлтүүр зөвхөн цэнэгтэй бөөмцрийг шүүж чадах учраас бөөмцрийн цэнэг болон шүүлтүүрт өгч буй орны хэмжээ нь шүүлтийн зэрэгт нөлөөлөх гол хүчин зүйлүүд болж байдаг. Цахилгаан оронд байгаа иончлогдсон хийн орчин дотор буй бөөмцрийн олж авах цэнэгийн хэмжээ нь орны утга болон түүний шугаман хэмжээнээс хамаарч байдаг. Цахилгаан шүүлтүүр ашиглан утааны хөө тортогийг шүүхийн тулд бөөмцрүүдийг янз бүрийн процессууд ашиглан цэнэглэж болох

боловч утааны шүүлтүүрт хамгийн тохиромжтой, энгийн хямд төсөр цэнэглэх арга нь титэмт ниргэлэг [2,3,9] юм. Түүнчлэн титэмт ниргэлгийг үүсгэж буй гаднын орныг бөөмцрийг хийн урсгалын бүсээс зайлуулахад давхар ашигладаг. Титэмт ниргэлэг тодорхой нэг хүчдлийн утгаас эхлэн явагдаж эхлэх бөгөөд цаашид хүчдлийг өсгөхөд тодорхой нэг утганд хүрээд ниргэлэг өөр горимд шилжинэ. Энэ тохиолдолд шүүлт явагдахаа больдог. Ийм учраас цахилгаан шүүлтүүрийн ажиллах хязгаар нь титэмт ниргэлэг үүсэх болон түүнээс ниргэлгийн өөр горимд шилжих параметруудийн утгаар тодорхойлогдоно. Энэ өгүүлэлд цахилгаан шүүлтүүрийн дотор явагдах титэмт ниргэлгийн хязгаарын параметруудийг тооцоолох асуудлыг авч үзлээ.

II. Титэмт ниргэлэг, түүний үүсэх нөхцөл

Хоёр электродын хооронд хүчдэл өгөхөд тэдгээрийн хооронд цахилгаан орон үүснэ. Энэ орны түгэлт электродын хэлбэр, харилцан байршлаас хамаарна. Тухайлбал агаар дотор байгаа тэнхлэгүүд нь давхацсан R_0 , r_0 радиустай хоёр цилиндрийн хооронд V хүчдэл өгөхөд тэдгээрийн хооронд үүсэх орон тэнхлэгээс r зайд $E = \frac{V}{r \ln(\frac{R_0}{r_0})}$ байна. Энэ функц r_0 -ийн орчим маш хүчтэй нэгэн төрөл биш чанартай байдаг. Харин орны хамгийн их утга $E_{max} = \frac{V}{r_0 \ln(\frac{R_0}{r_0})}$ дотоод цилиндрийн гадаргуу дээр үүсдэг. Орны энэ утгаар тэнхлэг нь давхацсан цилиндруудийн хоорондох орны утгыг илэрхийлбэл

$$E = \frac{E_0 r_0}{r} \quad (1)$$

байна. Энэ орны хүчлэгийн градиент $\frac{\partial E}{\partial r} = -\frac{V}{r^2} \ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)$ байх учраас орон их муруйлттай хурц электродын орчим маш хүчтэй төрөл бус байна.

Хурц электродын орчимд байгаа электрон хүчтэй орны нөлөөгөөр анодын зүг хөдлөхдөө хурдасч богино зайд их энерги олж авна. Энэ электроны энерги хийн орчны атом, молекулыг иончлох хэмжээнд хүрсэн үед нейтраль бөөмтэй мөргөлдөхдөө түүнийг иончилно. Анхны ба шинээр үүссэн электрон орны үйлчлэлээр дахин хурдасч дахин иончлол явуулна. Титэмт ниргэлэг дотор электронууд ийм байдлаар үржин олширч замдаа эерэг ионуудын мөр үлдсэн анод руу чиглэн хөдөлж байдаг. Электроны ингэж үржин олширох процесс хурц электродын орчим дахь өндөр хүчлэгтэй муж дотор явагдах боломжтой бөгөөд харин электрон хурц электродоос холдож сул орны мужид орох үед электрон чөлөөт замын уртын зайд иончлох хэмжээний энерги олж авч чадахгүй учраас электроны үржин олширох процесс зогсдог. Электрон үржин олширох мужид иончлолоос гадна өдөөлтийн процесс зэрэгцэн явагдаж байдаг учраас хурц электродын орчим сулхан хөх ягаан гэрэл үүсдэг. Энэ хэсгийг титэм гэж нэрлэх бөгөөд энэ утгаар нь хурц электродыг титэмлэгч электрод гэдэг. Энэ мужийн гэрлийн спектрт хөх, ягаан өнгө давамгайлж байдаг нь энэ мужид их энергитэй электронууд байгааг харуулж байгаа хэрэг юм. Шүүлтүүр дотор титэмт ниргэлэг тогтвортой асаж байгаа тохиолдолд бөөмцрийн шүүлт тасралтгүй явагддаг тул ниргэлэг стационар байх нөхцөл чухал ач холбогдолтой. Энэ нөхцөлийг судалъя.

III. Ниргэлэг стационар асах нөхцөл

Анод катодын хооронд үүсгэсэн цахилгаан оронд байгаа хий дундуур орны дагуу дрейфлэн хөдөлж байгаа нэг электрон 1 см туулахдаа үүсгэх (атомтай мөргөлдөж) электрон ионы хосын тоог α гэе. Үүнийг Таунсендын иончлолын коэффициент гэдэг. Катодын зүгээс хөдөлсөн N_0 электрон l зам туулахдаа $N_0 e^{\alpha l}$ тооны болж очно. Ийм байдлаар электронуудын үржин олширол явагдана. Нөгөө талаас стационар ниргэлэг явагдаж байхын тулд үржин олширох процессийг бий болгогч анхдагч электронууд байнга үүсэж байх ёстой. Ийм электронууд ион катодыг мөргөсний дүнд явагдах хоёрдогч электроны эмиссээр үүсдэг. Нэг ионы катодоос сугалах электроны тоо $\gamma = \frac{n_e}{n_i}$ -г хоёрдогч электроны эмиссийн коэффициент гэдэг. Тэгвэл нэгэн төрлийн тогтмол орны тохиолдолд ниргэлэг стационар асах нөхцөл дараах хэлбэртэй байна:

$$\alpha L = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right). \quad (2)$$

энд: L -электродуудын хоорондох зай.

Титэмт ниргэлгийн хувьд орон нэгэн төрөл биш учраас дээрх нөхцөлийг нэгэн төрлийн бус орны тохиолдолд өргөтгөн тодорхойлох ёстой. Нэгэн төрлийн биш орон дотор электрон хөдлөх явцад үүсэх электроны тоо орны утгаас хамаарна. Иймээс иончлолын коэффициент орноос хамаарсан $\alpha = \alpha(E(r))$ функц байна. Нөгөө талаас электронууд атомтай мөргөлдөх үедээ түүнд нэгдэн (аттэчмент) алга болж электроны тоо цөөрөх тул иончлолын коэффициентээс электроны аттэчментийн коэффициент a -г хасаж өгөх хэрэгтэй. Иймд нэгэн төрлийн бус орны тохиолдолд ниргэлэг стационар асах нөхцөл дараах хэлбэрт шилжинэ:

$$\int_{r_0}^R [\alpha(E(r)) - a] dr = K, \quad (3)$$

энд: r_0 -катод буюу титэмлэгч электродын радиус, R -катодын тэнхлэгээс электроны үржин олширох процесс зогсох цэг хүртлэх зай.

Дээрх тэнцэтгэлд агуулагдаж байгаа K коэффициентийг өмнөхийн адил дан ганц хоёрдогч эмиссээр үүсдэг гэж үзэж болохгүй. Энэ нь ниргэлгийн явцад явагдах фотоиончлол, ионы мөргөлт зэрэг процессуудын дүнд үүсэж байгаа электронуудын нийлбэрээр тодорхойлогдоно. Ниргэлгийн явцад электроны шууд иончлолоор үүсэх электронууд бүгдээрээ аттэчментээр алга болж байвал үржин олширох процесс тасарна. Ийм учраас энэ интегралын дээд хязгаар $\alpha(E(R)) = a$ нөхцөлөөр тодорхойлогдоно.

Орчин үеийн ниргэлгийн судалгаануудад эффектив иончлолын коэффициентийн хувьд дараах туршлагын функцийг хэрэглэдэг [3]:

$$\alpha_{эфф} = \alpha(E(r)) - a = 0.14\delta \left(\left(\frac{E}{31\delta} \right)^2 - 1 \right), \quad (4)$$

энд: E [кВ/см]-цахилгаан орон, $\delta = 0.386p/(273 + t)$ -агаарын харьцангуй нягт, p -агаарын даралт, t -Цельсийн температур. Энд буй цахилгаан орны хувьд коаксиаль цилиндрийн орныг авч стационар ниргэлгийн нөхцөл тооцвол:

$$\int_{r_0}^R \left[0.14\delta \left(\left(\frac{E_0 r_0}{31\delta r} \right)^2 - 1 \right) \right] dr = K. \quad (5)$$

Энэ интегралыг титэмлэгч электродын гадаргуугаас эхлэн электроны үржин олширох процесс дуусах цэг хүртэл буюу $\alpha_{эфф}(R) = 0$ нөхцөлийг хангах цэг хүртэл авах ёстой. Иймээс интегралын дээд хязгаар

$$R = \frac{E_0 r_0}{31\delta} \quad (6)$$

гэж тодорхойлогдох ба интеграл дараах хэлбэрт шилжинэ:

$$\int_{r_0}^{\frac{E_0 r_0}{31\delta}} \left[0.14\delta \left(\left(\frac{E_0 r_0}{31\delta r} \right)^2 - 1 \right) \right] dr = K. \quad (7)$$

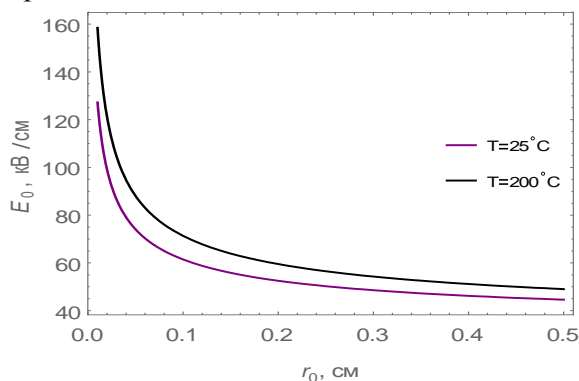
Энэ интегралыг бодвол дараах үр дүнд хүргэнэ:

$$-\frac{E_0 r_0}{31\delta} + \left(\frac{E_0}{31\delta} \right)^2 r_0 - \frac{E_0 r_0}{31\delta} + r_0 = \frac{K}{0.14\delta}.$$

Эндээс стационар титэмт ниргэлэг асахын тулд катодын орон ба титэмлэгч электродын радиусын хооронд дараах харьцаа биелэхийг тогтоож болно:

$$E_0 = 31\delta \left(\sqrt{\frac{K}{0.14\delta r_0} + 1} \right). \quad (8)$$

Үүнийг Пикийн хуультай [9] жишвэл $K = 0.013$ гэж олдоно. Энэ нь титэмт ниргэлэгтэй цахилгаан шүүлтүүрийн хувьд чухал хэрэглээ бүхий томьёо юм. Энэ томьёог ашиглан стационар ниргэлэг явагдаж байхын тулд катод (титэмлэгч электрод) дээрх орны утга E_0 ба титэмлэгч электродын радиусын хоорондын хамаарлыг температурын өөр өөр утганд гаргаж болно (Зураг 1). Хэдийгээр энэ хууль туршлагын томьёо боловч иончлолын эффектив огтлолын хэлбэр мэдэгдэж байгаа тохиолдолд үүнийг онолын хувьд гаргах боломжтой гэдэг нь эндээс харагдаж байна. Асаах орны утгын энэ илэрхийлийг ашиглан хүчдлийн ямар утганд титэмт ниргэлэг явагдаж эхлэхийг тодорхойлж. Асаах орны утгыг тэнхлэг нь давхацсан цилиндрүүдийн хоорондох орны түгэлтийн томьёонд



Зураг 1. Асаах орны утга титэмлэгч электродын радиусаас хамаарах нь.

орлуулбал ниргэлэг асах хүчдлийн утга титэмлэгч электродын радиусаас хамаарч дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$V_0 = 31\delta r_0 \ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right) \left(\sqrt{\frac{K}{0.14\delta r_0} + 1} \right). \quad (8)$$

Хүчдлийн энэ утгаас бага $V < V_0$ хүчдлийн утганд титэмт ниргэлэг үүсэхгүй. Харин хүчдлийн энэ утгаас эхлэн ниргэлгийн гүйдэл бүртгэгдэж эхлэх бөгөөд асаах хүчдлийн утганд харгалзах гүйдэл нь титэмт ниргэлэгийн гүйдлийн хамгийн бага утга юм. Энэ гүйдлийн утгыг бид сүүлд гаргах болно. Асаах хүчдлийн утга титэмлэгч болон цуглуулагч электродын радиусаас голлон хамаардаг (Зураг 3).

Титэмт ниргэлэг явагдаж эхлэх E_0 орны утгыг авч үзье. Энэ утгыг янз бүрийн орчинд титэмт ниргэлэг асаах замаар туршлагаар тогтоож болно. Ердийн агаар дотор бие дасан ниргэлэг явж эхлэхэд гүйдлийн утга 1 мкА хүртэл үсэрдэг. Иймээс электродуудын хооронд хүчдэл өгч гүйдлийг хэмжих замаар гүйдлийн үсрэлт эхэлж байгаа хүчдлийн утгыг тодорхойлоод үүнд харгалзуулан ниргэлэг асах үеийн катод дээрх орныг $E_0 = \frac{V}{r_0 \ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)}$

томьёогоор бодож олно. E_0 -г олсон тохиолдолд d титэмлэгч үеийн зузааныг мөн туршлагаар тогтоох боломжтой болно. Титэмлэгч үеийн зузааныг хэмжиж олсноор бага орны мужийн өргөн буюу бөөмцөр цэнэглэгдэх мужийн өргөнийг ч мөн тодорхойлох боломжтой.

IV. Титэмт ниргэлэг дэх цахилгаан орон ба цэнэгийн түгэлт

Бид дээр өгүүлсэн байдлаар гарган авсан 6 нунтаг дээжид рентген дифракцийн судалгааны арга ашиглан бүтцийн анализ хийсний дүнд хөө, үнсний доторхи талст болон аморф фазын агуулга, шинж чанарыг тогтоох судалгааг хийлээ. Судалгаанд MAXima_X XRD-7000 маркийн рентген дифрактометр багажийг ашигласан бөгөөд туршлагад зэс анод, Ni филтертэй (характеристик шугамын долгионы урт нь $\text{Cu}_{\text{K}\alpha 1} = 1.5406 \text{ \AA}$) рентген хоолойн хүчдэл, гүйдлийн утга 40кВ, 30мА, Брэггийн өнцгийн муж $2\theta = 5^\circ - 80^\circ$, гониометрийн өнцгийн алхам $\Delta 2\theta = 0.02^\circ$, нэг өнцөг алхамд детекторын бүртгэх хугацаа $\Delta t = 1.2 \text{ сек}$, цацрагийг багцлагч болон цуглуулагч завсаруудын хэмжээ $DS = 1^\circ$, $SS = 1^\circ$, $RS = 0.3 \text{ мм}$ байх хэмжилтийн нөхцөлд бүх урьдчилан бэлтгэсэн дээж бүрийн рентген дифрактограммуудыг бичиж авав. Хэмжилтийн үр дүнг боловсруулахдаа олон улсад зөвшөөрөгдсөн талст нэгдлийн дифрактограммын ICSD болон ICDD-PDF2 өгөгдөлийн сангуудтай X'Pert HighScore Plus v2.0a програм хангамжийг ашиглалаа.

Дээжүүдийн талст фазын чанарын анализын үр дүнг хүснэгт 2-д, тунагч үнс болон хөөний суурь үеийн рентген дифрактограммуудыг зураг 2-д тус тус үзүүлэв.

Хөө, үнсэнд агуулагдаж байгаа талст болон аморф фазын агуулгыг тогтоохдоо бодисын талст бүтцийн судалгаанд өргөн хэрэглэгддэг Ритвельдийн аргад суурилсан фазын тоон анализын аргыг ашиглав. Дээж дэх талст болон аморф фазуудын бодит агуулгыг үнэн зөв үнэлэхийн тулд судлах дээжид зориудаар дотоод стандарт талст фазыг тодорхой хувиар нэмж өгөөд түүний дифрактограммд Ритвельдийн аргаар үр дүнгийн боловсруулалтыг хийдэг. Уг судалгааны ажилд дотоод стандарт талст фазаар цахиурын NIST 640с (Si, 99.99%, 320миш) стандартыг ашиглав. Судалж буй нунтаг дээжид m тооны талст фазуудаас гадна аморф фаз A хэмжээтэй оршин байгаа үед талст болон аморф фазуудын агуулга хооронд дараах холбогдол байна гэж үздэг:

$$\sum_{i=1}^m X'_i = 1 - A, \quad (1)$$

энд: X'_i -дээж дэх i -рталст фазын бодит агуулга. Харин X'_i болон A хэмжигдэхүүн бүр нь харгалзан дараах томъёонуудаар илэрхийлэгдэнэ [5]:

$$X'_i = X_i \cdot \frac{R_s}{X_s} \cdot \left(\frac{1}{1 - R_s} \right), \quad (2)$$

$$A = \left(\frac{1}{1 - R_s} \right) \cdot \left(1 - \frac{R_s}{X_s} \right), \quad (3)$$

энд: R_s -судлах дээжид зориудаар нэмж өгсөн дотоод стандарт талст фазын бодит агуулга. Одоо титэмлэгч үеэс цааш орших сул орны мужид ниргэлгийн параметрууд ямар байхыг авч үзье. Сул орны мужид ионууд гүйдэл зөөж хэлхээг битүүрүүлж байдаг. Энэ мужид орон болон ионы түгэлт ямар байхыг Кулоны хууль болон тасралтгүйн тэгшитгэлээс олж болно:

$$\nabla \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \mathbf{j} = 0, \quad (11)$$

(ρ -сул орны муж дахь огторгуйн цэнэгийн нягт, ϵ_0 -цахилгаан тогтмол). Энэ мужид ион үүсэх болон устах процесс явагдахгүй учраас тасралтгүйн тэгшитгэлийн эхний гишүүн тэгтэй тэнцүү байна. Ерөнхий тохиолдолд ионы гүйдлийн нягт дараах хэлбэрээр илэрхийлэгдэх ёстой:

$$\mathbf{j} = \mu \rho \mathbf{E}, \quad (12)$$

энд: μ -ионы хөдлөц, \mathbf{E} -тухайн цэг дээрх орон. Агаар дотор үүсэх сөрөг ионы хөдлөц орноос сул хамаардаг учраас түүнийг цаашид тогтмол гэж үзэж болно. Авч үзэж буй систем тэнхлэгийн тэгш хэмтэй бөгөөд тэнхлэгийн дагуу орон өөрчлөгдөхгүй учраас цилиндр координатын системд дээрх тэгшитгэлүүд дараах хэлбэрт шилжинэ:

$$E_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\rho^2}{\epsilon_0} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r E_r)}{\partial r} = \frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (14)$$

Эхний тэгшитгэлээс E_r -г олбол

$$E_r = - \frac{\rho^2}{\epsilon_0 \frac{\partial \rho}{\partial r}}. \quad (15)$$

Үүнийг дараагийн тэгшитгэлд орлуулбал

$$r \rho \frac{\partial^2 \rho}{\partial r^2} - \rho \frac{\partial \rho}{\partial r} - 3r \left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \right)^2 = 0. \quad (16)$$

тэгшитгэлд хүргэнэ. Энэ тэгшитгэлийн ерөнхий шийд

$$\rho = \frac{C_2}{\sqrt{r^2 - C_1}}. \quad (17)$$

Сөрөг титэмт ниргэлгийн титэмлэгч электродын орчим хүчтэй орон дотор үүссэн электронууд агаар дотор байгаа цахилгаан сөрөг чанартай молекулуудад «урхидагдаж» сөрөг ионууд үүсгэх ба эдгээр нь орны эсрэг чиглэн анодын зүг хөдөлж хэлхээг битүүрүүлж байдаг. Хэлхээг битүүрүүлэгч энэхүү ионы гүйдлийн нэгж уртад ноогдох хэсэг нь $I = I'/l = \rho u S/l = 2\pi r \rho \mu E$ байх ба эндээс цэнэгийн нягт

$$\rho = \frac{I}{2\pi r \mu E} \quad (18)$$

байна. Тэгвэл титэмлэгч үеийн төгсгөл дээр дараах нөхцөлүүд хүчинтэй байна:

$$\rho(r = r_0) = \frac{I}{2\pi r_0 \mu E_0}, \quad (19)$$

$$\left. \frac{\partial \rho}{\partial r} \right|_{r=r_0} = - \frac{I}{2\pi \mu E_0 r_0^2}, \quad (20)$$

энд: E_0 -асаах орны утга. Эдгээрийг ерөнхий шийдэд тооцвол шийд дотор байгаа тогтмолууд $C_1 = 0$, $C_2 = \frac{I}{2\pi \mu E_0}$ болж ниргэлгийн бага орны мужид ионы гүйдлийн нягт

$$\rho = \frac{I}{2\pi \mu E_0} \frac{1}{r} \quad (21)$$

болно. Үүнийг орныг тодорхойлох тэгшитгэлд тооцон цахилгаан орны түгэлтийг олж болно:

$$E_r = \frac{r_0 E_0}{r} + \frac{I}{2\pi\mu\epsilon_0 E_0} \left(1 - \frac{r_0}{r}\right). \quad (22)$$

Харин цэнэгийн нягтын түгэлт тухайн цэг дээрх орны утгаар тодорхойлог-доно гэж үзвэл ионы гүйдлийн нягт

$$\rho = \frac{I}{2\pi\mu E_r r} \quad (23)$$

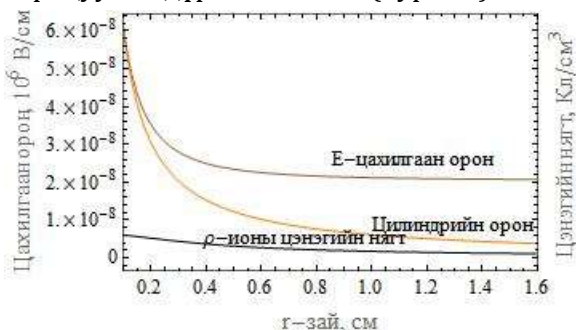
байна. Үүнийг Гауссын теорем буюу орныг тодорхойлох тэгшитгэлд тооцвол дараах хэлбэрт шилжинэ:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rE_r)}{\partial r} = \frac{I}{2\pi\mu\epsilon_0 E_r r}. \quad (24)$$

Энэ тэгшитгэлийн шийдийг олохын тулд хувьсагчийг ялгаж r_0 -оос r хүртэлх хязгаарт интегралчилж $E_r(r_0) = E_0$ болохыг санавал r радиуст харгалзах цэг дээрх цахилгаан орны утга:

$$E_r = \sqrt{\frac{I}{2\pi\mu\epsilon_0} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \left(\frac{r_0 E_0}{r}\right)^2}. \quad (25)$$

Бид (23), (25) илэрхийллүүдийг ашиглан титэмт ниргэлгийн цахилгаан орон болон ионы цэнэгийн нягтыг цилиндрийн оронтой харьцуулан дүрсэлж болно (Зураг 2).



Зураг 2. Титэмт ниргэлгийн доторхи цахилгаан орон ба ионы цэнэгийн нягтын түгэлт

Дээр гаргасан орны илэрхийллүүд аль ч тохиолдолд гүйдэл тэг утгатай байх үед коаксиаль цилиндрийн орныг өгч чадахаас гадна хязгаарын гүйдлийн зөв утгыг ч өгдөг. Гэхдээ эхний илэрхийлэл нь вольт-амперийн характеристикийн зөв илэрхийллийг өгдөггүй гэдгийг тэмдэглэе.

V. Титэмт ниргэлэг стримерт шилжих нөхцөл

Цахилгаан орны (25) илэрхийллийг

$$E_r = \sqrt{\frac{I}{2\pi\mu\epsilon_0} + \left(E_0^2 - \frac{I}{2\pi\mu\epsilon_0}\right) \frac{r_0^2}{r^2}} \quad (26)$$

хэлбэртэйгээр бичиж харвал электродын хоорондох орон титэмлэгч электродоос холдох тусам буурах бөгөөд харин гүйдлийн хүчнээс хамаарч квадрат язгуур хуулиар өснө. Ийм хамаарал хүчин төгөлдөр үйлчилж байх үед титэмт ниргэлэг үргэлж тогтвортой асдаг. Коаксиаль цилиндрийн хооронд өгч байгаа хүчдлийн утгаас хамаарч энэ хамаарал өөрчлөгдөж болно. Өгч буй хүчдлийн утгаас хамаарч гүйдэл өснө. Гүйдлийн (гаднаас өгч буй хүчдлээр тодорхойлогдоно) тодорхой утганд электродуудын хоорондох орны түгэлт дээрх түгэлтээс өөр хэлбэрт шилжих тэр гүйдлийн утгыг олъё. Дээрх хуулиас харахад гүйдлийг ихэсгэх тусам язгуур дор байгаа илэрхийллийн хоёрдугаар гишүүн багассаар гүйдлийн тодорхой нэг утганд тэг болно. Энэ үед электродын хоорондох орон нэг тогтмол жигд утганд хүрнэ. Ийм жигд нэгэн төрлийн орон дотор хий маш хялбархан нэвт цохигддог.

Титэмт ниргэлгийн орны түгэлтийн (25) томъёоноос гүйдлийн хамгийн бага утга тэг байхыг гаргаж болно:

$$I_{min} = 0. \quad (27)$$

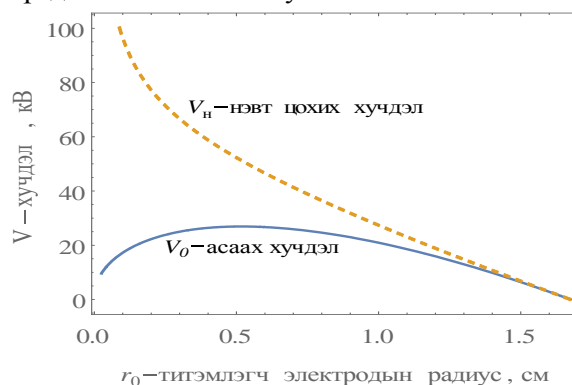
Энэ үед цахилгаан орны түгэлт коаксиаль цилиндрийн хоорондох орны түгэлттэй адил байна. Харин гүйдэл ихэссээр

$$I_{max} = 2\pi\mu\epsilon_0 E_0^2 \quad (28)$$

утганд хүрэх үед цилиндрийн хоорондох орны түгэлт нэгэн төрөл

$$E_r = E_0$$

утгатай болно. Гүйдлийн хэмжээ I_{max} утга хүрэхэд электроны үржин олширох процесс стримерт [10] шилжиж хий нэвт цохигдох учраас энэ нь титэмт ниргэлэгт ажиглаж болох гүйдлийн хамгийн их утга юм.



Зураг 3. Титэмт ниргэлгийн асаах хүчдэл болон нэвт цохигдох хүчдэл титэмлэгч электродын радиусаас хамаарах нь ($R = 1.675$ см)

Стример үүссэнээр титэмт ниргэлэг очит цахилалтад шилжих ба энэ тохиодолд электродуудын хоорондох хүчдэл буурч шүүлтийн процесс зогсдог. Ийм учраас стример шүүлтийн процессийг дээд талаас нь хязгаарлагч үзэгдэл болдог. Үүнд харгалзан титэмт ниргэлгийн гүйдлийн авч болох хамгийн их утга $I_{max} = 2\pi\mu\epsilon_0 E_0^2$ байна.

Эндээс үзэхэд стример үүсэхийн тулд огторгуйн цэнэгийн үүсгэж байгаа орон гаднын оронтой жишихүйц болдог байна. Стример үүсэх буюу нэвт цохигдох хүчдлийн утгыг гаргая (Зураг 3). Хий нэвт цохигдох үед орон

$E_r = E_0$ тогтмол утгатай болох учраас түүнд харгалзах нэвт цохилтын хүчдэл

$$V_n = \int_{r_0}^R E_r dr = E_0(R - r_0). \quad (29)$$

Энэ томъёоноос титэмлэгч электродын радиус өсөхөд титэмт ниргэлгээс стримерт шилжих буюу хий нэвт цохигдох хүчдлийн утга шугаман хуулиар буурах зүй тогтол харагдаж байна. Гэтэл асаах орны утга титэмлэгч электродын радиусаас $\sqrt{1/r_0}$ хуулиар хамаардаг учраас титэмлэгч электродын радиус өсөх тусам асаах хүчдлийн утга шугаман хуулиас гаждаг.

- [1] Ж.Ванчинхүү, Б.Бат-эрдэнэ, "Цахилгаан статик шүүлтүүрийн шүүх чадварыг түүний хэлбэр хэмжээтэй уялдуулан тооцоолох нь", МУИС, Эрдэм шинжилгээний бичиг, Физик, **425** (19), 37, (2015)
- [2] В.И.Левитов, И.К.Решидов и др. "Дымовые электрофилтры", Издательство Энергия, (1980)
- [3] K.Parker, "Electrical operation of electrostatic precipitators", The institution of engineering and technology, (2007)
- [4] H.J.White, Ind. Engineering Chem, **47**, 932, (1955)
- [5] K.Yan, "Electrostatic precipitation 11th International Conference on Electrostatic Precipitation", Hangzhou, (2008)
- [6] V.Thonglek, T.Kiatsiriroat, J. Eng. Technol. Sci., **46** (3), 271, (2014)
- [7] C.E.Brennen, "Fundamentals of multiphase flow", Cambridge University Press, (2005)
- [8] M.W.McElroy, R.C.Carr and et. al. Science, **215** (4528), 13, (1982)
- [9] М.Н.Лившиц, В.М.Моисеев, "Электрический явления в аэрозолях и их применение", Издательство Энергия, (1965)
- [10] А.В.Ивановский, ЖЭТФ, Т66, Выпуск **8**, 59, (1996)