

ELEKTRON CİHAZLARIN İŞLƏMƏ QABİLİYYƏTİNİN ANALİZİ ÜÇÜN HİDRODİNAMİK METOD

E.Ə. KƏRİMOV, S.N. MUSAYEVA

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

Bakı, Azadlıq pros. 16/21, AZ 1010

E-mail: E.Kerimov.fizik@mail.ru

Diffuziya, elektrik keçiriciliyi, istilik keçiriciliyi, termoelektrik hadisələr elektron cihazlarda cərəyan, gərginlik kəmiyyətlərinin qiymətlərini təyin edir. Elektrik və maqnit sahələrinin intensivlikləri, cərəyan, gərginlik kimi fiziki parametrlərin təyin olunması və hesablanması, həmçinin bu kəmiyyətlər arasında funksional asılılıqların yaranmasının tədqiqi üçün daha sadə hidrodinamik metod təklif olunmuşdur.

Açar sözlər: elektron cihazlar, fiziki hadisə, termoelektrik hadisə, yük daşınması, kvazineytrallıq.

UOT: 666.9-129

PACS: 73.40.Ns, 73.40.Sx, 72.10.-d

Elektron və radioelektron cihazlarda yük daşıyıcıların individual xassələri mühüm olmayıb, onların özlərini kollektiv şəkildə necə apardıqları vacib amil sayılır. Elektron qazında kvazineytrallığın pozulması, və ya xarici təsir nəticəsində elektrik sahəsinin mövcud olması zamanı sahəni λ_D debay uzunluğu məsafədə ekranlaşdırmaq üçün, elektronlar yenidən paylanır. Beləliklə, debay uzunluğu kollektiv hərəkət başlanan sərhəd x məsafəsini təyin edir, yəni λ_D kollektiv hərəkət oblastını ($\lambda_D > x$) individual zərrəciklərin hərəkəti oblastından ($\lambda_D < x$) ayırır. Elektron cihazlarda müşahidə olunan əksər kəmiyyətlər zərrəciklər ansamblının orta hərəkəti ilə təyin olunur. Ona görə də, uyğun olan ümumi nəzəri təsvir statistik təsvir sayılır. Statistik mikroskopik yanaşma məsələsi kinetik əmsalların – yürüklüyün, differensial və statistik keçiriciliyin, diffuziya əmsalının və s. maddənin xassələrini (yük daşıyıcıların effektiv kütləsi, qəfəsin temperaturu, ionlaşma enerjisi və s.) təyin edən parametrlərdən və konkret elektron cihazda reallaşan şəraitdən (gərginlik, sərhəd şərtləri və s.) asılı olaraq təyin olunmasındadır.

Kinetik əmsallar zərrəciklərin \vec{v} sürəti, \vec{r} koordinatı və t zamanından asılı olan $f(\vec{v}, \vec{r}, t)$ paylanma funksiyası ilə xarakterizə olunan statistik ansambla görə ortalama nəticəsində alınır. $f(\vec{v}, \vec{r}, t)$ funksiyasının mənası $f(\vec{v}, \vec{r}, t) d\vec{r} d\vec{v}$ hasilinin $d\vec{r} d\vec{v}$ həcm elementində yüklənmiş zərrəciklərin say ehtimalıdır. Fərz edək ki, E elektrik sahəsi və onun qradienti x oxu üzrə yönəlib və deməli, x oxuna perpendikulyar istiqamətdə elektron qazının halı fəza-bircinsdir yəni, $f_e = f_e(x, u, \theta, t)$ (burada, θ – elektrik sahəsinin istiqamətilə sürət vektoru arasındakı bucaqdır).

Kiçik təzyiqlərdə elektron və ionların sərbəst qaçış yolunun uzunluğu elektrodətrafi təbəqələrin ölçüləri ilə müqayisə olunan olduqda, Bolsman tənliyinin ikihədli yaxınlaşma həlli tətbiq oluna bilmir. Boşalmanın mənzərəsini almaq üçün ən adekvat prosedür kinetik tənliyin Monte-Karlo həllidir. Monte-Karlo metodu ilə hesablamalarda, sahədə elastiki və qeyri-elastiki toqquşmaları nəzərə almaqla, yüklənmiş zərrəciklərin hə-

rəkətinin ehtimalı ssenarisinə baxılır. Adətən, hesablama zamanı hər bir zərrəciyin trayektoriyası izlənir ki, bu da hətta ən optimal alqoritmdə belə nəhəng hesablamalara gətirir. Ona görə də son zamanlar PIC-MCC adlanan alqoritmlər inkişaf etmişdir ki, bu alqoritmlər adi Monte-Karlo metodu ilə müqayisədə hesablamaların həcmi və operativ yaddaşın resurslarını azaltmağa imkan verir. PIC (particle-in-cell) metodları iri zərrəciklərin müxtəlif variantlarına əsaslanır [1].

Kvazihissəciklər elektrik sahəsində klassik mexanikanın qanunlarına əsasən hərəkət edir və adi elektron və ionlar kimi neytral molekullarla toqquşurlar. Model plazmada kvazihissəciklərin sıxlığı ($\sim 10^3 \dots 10^5 \text{sm}^{-3}$) olduğundan və “laborator” plazmadakı zərrəciklərin ($\sim 10^8 \dots 10^{11} \text{sm}^{-3}$) sıxlığından nəzərəcarpacaq dərəcədə kiçik olması səbəbindən, praktikada kvazihissəciklərin trayektoriyasının və toqquşma proseslərinin hesablanması üçün Monte-Karlo metodu ilə aparılan alqoritmləri reallaşdırmaq daha asan olardı. Belə olan halda Monte-Karlo metodu ilə kombinə olunmuş PIC metod (PIC-MCC metod) aşağı təzyiqli boşalmaların modeləşməsi üçün aktiv tətbiq olunur [2].

Bolsmanın mikroskopik bərabərliyi əsasında daha sadə makroskopik hidrodinamik bərabərliklər çıxarmaq mümkündür. Hidrodinamik modelin istifadə olunması onu göstərir ki, biz elektron qazını orta sıxlıq, orta sürət, təzyiq və özlülük əmsalı ilə xarakterizə olunan və toqquşmaların tezliyi ilə təyin edilən hər hansı yüklənmiş kəsilməz maye mühiti ilə əvəz edirik. Hidrodinamik modelin istifadə olunması onu göstərir ki, biz elektron qazını orta sıxlıq, orta sürət, təzyiq və özlülük əmsalı ilə xarakterizə olunan və toqquşmaların tezliyi ilə təyin edilən hər hansı yüklənmiş kəsilməz maye mühiti ilə əvəz edirik. f funksiyasının momentinin hesablanması f -in $Q = 1$, \vec{v} , $\vec{v}\vec{v}$ və s. hasilini və sürətlər fəzası üzrə inteqrallamaq deməkdir. Əgər $c(f) = (\partial f / \partial t)_{\text{toq}}$. Asılılığı elastiki toqquşmaların, həyəcanlanmanın, ionlaşmanın, yarışmanın və rekombinasiyanın paylanma funksiyasına tam təsirini təsvir edirsə, aşağıdakı bərabərliyi alarıq:

$$\int Q \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) d\vec{v} + \int Q \vec{v} \vec{\nabla}_{\vec{r}} f d\vec{v} + \int Q \left(\frac{F}{m} \right) \vec{\nabla}_{\vec{v}} f d\vec{v} = \int Q c(f) d\vec{v}. \quad (1)$$

Paylanma funksiyasının sıfır momenti ($Q = I$ olduqda) elektronların orta sıxlığını (konsentrasiyasını) təyin edir:

$$n(\vec{r}, t) = \int f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} . \quad (2)$$

Bolsman bərabərliyinin sıfır momentlərini ($Q = I$ olduqda) (1) bərabərliyinin sol tərəfində üçüncü inteqral sıfıra bərabər olur) və paylanma funksiyasını istifadə edərək, (1) ifadəsindən kəsilməzlik tənliyini alırıq:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla}_{\vec{r}}(n\vec{v}) = n(\vec{v}_i - \vec{v}_a - \vec{v}_r) \equiv n\vec{v} , \quad (3)$$

burada, $\vec{v}_i, \vec{v}_a, \vec{v}_r$ - kəmiyyətləri vahid zamanda vahid həcmdə elektronların sayının sürətə görə ionlaşma, yapışma və rekombinasiya səbəbindən orta dəyişməsinə təyin edir. İonlaşma (\vec{v}_i) həcmdə elektronların sayını artırdığından, yapışma (\vec{v}_a) və (\vec{v}_r) rekombinasiya isə

azaldığından bu kəmiyyətlər (3) ifadəsinin sağ tərəfinə müxtəlif işarələrlə daxil olurlar.

Əgər (3) ifadəsinin sağ və sol tərəfini zərrəciyin yükünə vursaq, kəsilməzlik tənliyini aşağıdakı şəkildə yazı bilərik:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}_{\vec{r}} \vec{j} = \rho \vec{v} , \quad (4)$$

burada, $\rho = en$ və $\vec{j} = en\vec{v}$ – uyğun olaraq yükün həcmi sıxlığı və cərəyan sıxlığıdır.

Sürətə nəzərən paylanma funksiyasının ilkin anı zərrəciklərin orta sürətini təyin edir:

$$\vec{v}_0(\vec{r}, t) = \left[\frac{1}{n(\vec{r}, t)} \right] \int \vec{v} f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} . \quad (5)$$

Paylanma funksiyasının ilkin anını ($Q = \vec{v}$) istifadə etməklə (5 ifadəsi) və Bolsman bərabərliyinin ilkin anını yazaraq (1 ifadəsi) hərəkət tənliyini (impulsun dəyişməsi) alırıq:

$$\frac{d\vec{v}_0}{dt} = -\frac{e}{m} (\vec{E} + \vec{v}_0 \times \vec{B}) - v_{toq.} \vec{v}_0 - \frac{1}{n(\vec{r}, t)} \vec{\nabla}_{\vec{r}} \int (\vec{v}_0 - \vec{v})(\vec{v}_0 - \vec{v}) f d\vec{v} , \quad (6)$$

burada, $v_{toq.}$ – toqquşmaların impulsun dəyişməsi ilə effektiv tezliyidir. Aparıcı rolu zərrəciklərin toqquşması oynayan lokal tarazlıq halında ionlaşmış mühitin təzyiqini temperatur ilə əlaqələndirmək olar və bu zaman (6) ifadəsinin axırıncı həddi $\left(\frac{kT_e}{m}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \vec{\nabla}_{\vec{r}} \rho$, Burada k - Bolsman sabitidir. Yüklənmiş mayenin hərəkət tənliyini Maksvel tənlikləri və sərhəd şərtləri ilə kombinasiya edib aşağıdakı qarşılıqlı təsirdə olan alt sistemlərin hansı şəkildə olacağını nəzərdən keçirmək olar: elektrik

sahəsi, cərəyan daşıyıcıların alt sistemi, kristallik qəfəsin atomlarının istilik rəqslərinin alt sistemi. Bərabərliklərin belə sistemi daşınma hadisələri reallaşan elektron cihazlarda (elektrik vakuüm cihazları, dinamik idarə olunan İYT-cihazları, yarımkeçirici, qaz boşalması, plazma, optoelektron cihazlar) gedən prosesləri analiz etməyə imkan verir. Son nəticədə proseslərin analizində və cihazların VAX-nın qurulmasında istifadə olunan əsas bərabərliklər aşağıdakı şəkildə olacaqdır:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho; \quad (8)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e}{m} (\vec{E} + \vec{v}_0 \times \vec{B}) - v_{toq.} \vec{v}_0 - \left(\frac{kT_e}{m}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \vec{\nabla}_{\vec{r}} \rho; \quad (9)$$

$$\rho = en, \quad \vec{j} = \rho \vec{v}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}. \quad (10)$$

Cərəyanın \vec{j} - sıxlığı və yükün ρ həcmi sıxlığı kəsilməzlik tənliyi ilə əlaqədardır.

Toqquşmalar olmadıqda kəsilməzlik tənliyi Maksvel (7), (8) bərabərliklərindən alınır. (7) – (10) bərabərliklər sistemi, əksər elektron cihazlarda fiziki prosesləri korrekt şəkildə təsvir etmək üçün, daha ümumi bərabərliklər sistemi sayılır. Ona görə də, onların tədqiq olunmasının analitik metodları yalnız əlavə sadələşdirici fərziyyələrlə bir sıra xüsusi hallar üçün tətbiq oluna bilər [3, 4]. Lakin, son zamanlar yüksək işləmə qabiliyyətinə malik kompüterlərə əsaslanan hesablama texnikasının sürətli inkişafı və bunun nəticəsində hesablama metodlarının geniş tətbiq olunması MHD məsələlərinin həllində nəzərəcarpacaq uğurların əldə olunmasına səbəb oldu. İnkişaf etmiş hesablama metodları analitik metodlara nəzərən böyük universallığa malikdir və əvvəlcədən verilmiş dəqiqliyə malik

həllərin tapılmasına imkan yaradır. Onu da qeyd etməliyik ki, MHD-nin bir və ikiölçülü məsələlərinin həlli üsulları yaxşı işlənilsə də, üçölçülü praktiki mühüm məsələlərin hesablamaları nadir hallarda mümkün olur.

MHD bərabərliklərinin həllinin hesablama metodlarından mümkün olanı variasiya və son fərqlər metodlarıdır. Birinci halda məsələnin mahiyyəti kəsilməz arqumentin funksiyası ilə təsvir olunan kəsilməz mühitin baxılan oblastında onun fərq analoqu ilə əvəz olunmasıdır. Mühitin bu modeli sonlu sayda nöqtələrdə təyin olunan diskret funksiyaların kəməyi ilə verilir. Nöqtələrin belə çoxluğu fərq toru adlanır. Bu zaman ilkin modelin differensial tənlikləri sonlu – fərq münasibətinə keçir. Nəticədə, sistemin kəsilməz modeli fərq bərabərliklərinin yığılı – fərq sxemi ilə approksimasiya olunur [5].

Fərq sxemi kəsilməz mühitin əsas xassələrini əks etdirməlidir. Ona görə də, ilk növbədə sxem üçün ilkin

əsas saxlanılma qanunlarının fərq analoqlarının düzgün olması tələb olunmalıdır. Belə xassələrə malik fərq sxemləri konservativ sxemlər adlanır. Belə olan halda, əsas saxlanılma qanunlarını istifadə edərək, müxtəlif disbalanslardan yaxa qurtarmaq üçün, bir sıra tor münasibətləri daxil edilir. Belə sxemlər tam konservativ sxemlər adlanır.

Tam konservativ fərq sxemlərinin xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, hadisənin müəyyən fiziki aspektini əks etdirən differensial tənliklər sisteminin yazılışının bütün müxtəlif növlərini eyni zamanda approksimasiya edir. Nəticədə belə sxemlər digər tip sxemlərə nisbətən kobud torlarda həlli kifayət qədər təhrif edən fiktiv enerji mənbələri yaratdıqları halda, məsələn, kinetik və daxili enerjilər arasında münasibətləri düzgün ötürür.

Variasiya metodları daha ümumi şəkildə sonsuzölçülü xətti fəzada hər hansı funksionalın minimumlaşdırma məsələsini əvəz edir.

NƏTİCƏ

MHD tənliklər sistemi xətti, özünüqoşma və müəyyən müsbət operatorlu Hilbert fəzasında operator bərabərliyi kimi qəbul edilir. Variasiya metodlarının müasir reallaşması əksər hallarda funksiyaların yalnız seçilmiş torun sonlu özəklərində sıfır bərabər olduğu torlu metodlar vasitəsi ilə mümkündür. Nəticədə, bərabərliklər sisteminin matrisi seyrəkləşmiş olur ki, bu da ilkin bərabərliklər sisteminin həllinin axtarılması prosesini nəzərəcarpacaq dərəcədə yüngülləşdirir.

- [1] *В.П.Драгунов, И.Т.Неизвестный, В.А.Гридчин. Основы наноэлектроники. м" 2006.*
- [2] *Н.Д. Федоров, Д.Н. Федоров. Толковый словарь по электронике. М.: Радио и связь, 2001.*
- [3] *И.П. Степаненко. Основы микроэлектро-*

- ники. М.; СПб.: Лаб. баз. знаний «Невский Диалект», физматлит, 2001.*
- [4] *В.А. Прянишников. Электроника: Курс лекций. СПб.: Корона принт, 2000.*
- [5] *Г.Г. Шишкин. Приборы квантовой электроники. М.: СайнсПресс, 2004.*

Е.А. Керимов, S.N. Musayeva

HYDRODYNAMIC METHOD FOR ANALYZING THE OPERABILITY OF ELECTRONIC DEVICES

The processes of diffusion, electrical conductivity, thermal conductivity and thermoelectric phenomena are the determining values of currents and voltages in electronic devices, so to determine and calculate such physical parameters: current, voltage, electric and magnetic field strengths, as well as to establish functional dependencies between them, a hydrodynamic method is proposed.

Э.А. Керимов, С.Н. Мусаева

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ АНАЛИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Процессы - диффузия, электропроводность, термоэлектрические явления, теплопроводность являются определяющими для величин токов и напряжений в электронных приборах. Для определения и вычисления этих физических параметров: тока, напряжения, напряженностей электрических и магнитных полей, а также установления функциональных зависимостей между ними предложен гидродинамический метод.

Qəbul olunma tarixi: 03.02.2021