

ЗА МЕЖАМИ ЗАКОНУ ОМА

Василенко А.О., Скіцько І.Ф.

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Перемоги, 37, Київ, 03056
e-mail: tema200514@gmail.com*

Згідно закону Ома, сила струму прямо пропорційна прикладеній напрузі до провідника, тобто вольт-амперна характеристика (ВАХ) є лінійною функцією $I = U/R$ і опір R не залежить від U . Якщо це не так (закон Ома не виконується), то ВАХ є нелінійна. Найпростіший приклад провідника, в якому порушується закон Ома, є спіраль лампи розжарення. При підвищенні напруги спіраль розжарюється і її опір R збільшується. Це означає, що закон Ома справедливий тільки при достатньо малих I і U .

Запишемо закон Ома в диференційній формі: $j = \sigma E$, де j – густина струму, $\sigma = 1/\rho$ – електропровідність провідника, ρ – його питомий опір, $E = U/l$ – напруженість електричного поля, l – довжина провідника. Закон Ома передбачає лінійний зв'язок між густиною струму j і напруженістю поля E . Якщо провідність σ залежить від E , то залежність $j(E)$ стає нелінійною і закон Ома порушується. Які ж причини порушення закону Ома. Розглянемо рух електронів в провідниках, коли поле відсутнє і коли воно є.

Багато речовин, які проводять електричний струм, є кристалічними. Частина атомів іонізована і електрони, які відірвались від атомів, утворюють концентрацію “вільних” електронів, що можуть переміщуватись по провіднику. Їх називають електронами провідності. В металах їх концентрація не залежить від температури, в напівпровідниках залежить. Рух електронів в кристалі можна описувати за допомогою 2-го закону Ньютона – $F = m^* \cdot a$, тільки маса m^* називається ефективною масою і відрізняється від маси m_e електрона у вакуумі. Ця різниця відображає взаємодію електрона провідності з кристалічною ґраткою. Так як структури ґраток різні в різних провідниках, то і m^* електрона в них будуть різні. При цьому m^* може бути як більшою, так і меншою m_e .

У відсутності електричного поля електрони провідності здійснюють хаотичний тепловий рух у різних напрямках. У напівпровідниках середня швидкість такого руху $v_0 = 4,5 \cdot 10^5$ м/с (напівпровідник GaAs) і залежить від температури. В металах $v_0 \approx 10^6$ м/с і практично не залежить від температури. Якщо в такому середовищі, є електричне поле, то на електрони

буде діяти сила $-e\vec{E}$, яка надає йому прискорення $\vec{a} = -e\vec{E}/m^*$. Тоді швидкість i -го електрона після зіткнення буде $\vec{v}_i = -e\vec{E}t_i/m^*$ де t_i – час, який пройшов з моменту останнього зіткнення електрона з атомами середовища. Тоді середня швидкість N електронів буде: $v_{др} = eE\tau/m^*$, де $\tau = \sum_{i=1}^N t_i/N$ має зміст середнього часу вільного пробігу. Таким чином під дією електричного поля електрони набувають додаткову швидкість (її називають дрейфовою), яка направлена паралельно полю E . Якщо концентрація електронів в провіднику n , то густина струму буде: $j = env_{др} = (e^2n\tau/m^*)E$. Якщо порівняти цю формулу із законом Ома в диференційній формі, то $\sigma = e^2n\tau/m^*$. Ця формула називається формулою Друде. Закон Ома справедливий, якщо ні одна із величин, які входять в цю формулу не залежать від E .

Коли справедливий закон Ома

Перш за все розглянемо, при яких умовах величина τ не змінюється під дією поля E . Час τ залежить від швидкості електронів v_0 . Дрейфова швидкість $v_{др} = eE\tau/m^*$ зростає при збільшенні електричного поля E . При малому полі, величиною $v_{др}$ можна знехтувати порівняно із v_0 і можна вважати, що τ не залежить від поля E . При великих полях E , коли $v_{др}$ є порівняльна з v_0 , то час вільного пробігу τ залежить від електричного поля. Таким чином, для виконання закону Ома необхідно, щоб виконувалась умова: $v_{др} \ll v_0$, тобто напруженість електричного поля в провіднику повинна бути набагато меншою $E = m^*v_0/(e\tau)$. Для напівпровідників $v_0 \sim 10^5$ м/с, тому щоб досягти значення $v_{др} \approx v_0$ потрібно до нього прикласти поле $E \sim 10^6$ В/м. Це велика величина, порівняльна с напруженістю поля в блискавці. Але таке поле вдається створювати в напівпровідниках.

Є ще одне, більш сильне обмеження на швидкість $v_{др}$. Вона повинна бути меншою швидкості звуку в провіднику ($a v_{зв} \sim 10^3$ м/с): $v_{др} < v_{зв}$. Як тільки $v_{др} \approx v_{зв}$ в кристалі збуджуються звукові коливання. При цьому τ і σ , яка пропорційна τ , можуть зменшитись. Тобто, в полі $E_{зв} \geq m^*v_{зв}/(e\tau)$ провідність починає залежати від величини E і закон Ома порушується.

Але це ще не все. Розглянемо вплив нагрівання провідника на величину τ . Кристалічну ґратку і електрони провідника будемо характеризувати температурами $T_{гр}$ і T_e , відповідно. При відсутності поля E (струм відсутній) електрони знаходяться в тепловій рівновазі з ґраткою і оточуючим середовищем: $T_e = T_{гр} = T_c$. Поле E діє на електрони і розігріває перш за все їх. Тільки потім від електронів тепло передається ґратці, а потім оточуючому середовищі. Тому при наявності поля теплова рівновага порушується так, що $T_e > T_{гр} > T_c$. Якщо теплопередача від провідника до оточуючого середовища

гірша теплопередачі від електронів до атомів, то ґратка з електронами розігріваються як ціле, тому $T_e - T_{гр} \ll T_{гр} - T_c$. Можливий і обернений випадок: $T_e - T_{гр} \gg T_{гр} - T_c$. В металах v_0 практично не залежить від температури. А в напівпровідниках збільшення T_e під дією поля E означає збільшення v_0 і зменшення τ . Якщо зміна Δv_0 швидкості v_0 мала, тобто $\Delta v_0 \ll v_0$, то залежність v_0 від поля E і, значить, τ від E можна знехтувати. Умова $\Delta v_0 \ll v_0$ еквівалентна умові $\Delta T_e \ll T_e$.

Таким чином, умова незалежності τ від величини поля E , необхідна для виконання закону Ома. Тому необхідні такі обмеження на області для застосування цього закону: $v_{др} \ll v_0$, $v_{др} < v_{зв}$, $\Delta T_e \ll T_e = T_c$.

Порушення будь якого із цих нерівностей може привести до відхилення від виконання закону Ома.

Напівпровідники в сильному електричному полі

У зразку, по якому протікає струм I , виділяється потужність: $P = I^2 R = \sigma E^2 l S$, де l – довжина, S – площа, поперечного перерізу зразка. В одиниці об'єму виділяється потужність $P_{пит} = \sigma E^2$. При одному і тому ж $P_{пит}$ електричне поле $E = \sqrt{P_{пит}/\sigma}$ в напівпровідниках значно більше, ніж в металах, так як в них σ значно менше. Значить, в них легше порушити умову $v_{др} < v_{зв}$, $v_{др} \ll v_0$. Крім цього, на кожний електрон в напівпровіднику приходить більша потужність, ніж в металах. Електронний газ розігрівається сильніше, тому і нерівність $\Delta T_e \ll T_e$ теж порушується легше.

Порушення кожної із умов $v_{др} \ll v_0$, $v_{др} < v_{зв}$, $\Delta T_e \ll T_e = T_c$ дуже залежить від типу напівпровідника. Наприклад, в напівпровідниках Ge, Si, GaAs, InP відхилення від закону Ома зв'язано з порушенням умови $\Delta T_e \ll T_e$. При цьому $\tau(E) \sim 1/E$ і густина струму від поля $j(E)$ зв'язана тільки із зміною m^* і n (концентрація). Якщо $\tau \sim 1/E$, то $v_{др} = eE\tau/m^*$ не повинна залежати від напруженості E . Проте наприклад, в GaAs це не так. На рисунку 1. приведена залежність $v_{др}(E)$. Спочатку відбувається зростання $v_{др}$ (струму), потім при $E=E_n$ досягається максимум $v_{др}$, а при $E > E_n$ $v_{др}$ зменшується. Це означає, що при $E > E_n$ не тільки зменшується τ , але і збільшується m^* електронів. Збільшення m^* пов'язане із зміною взаємодії електронів з кристалічною ґраткою.

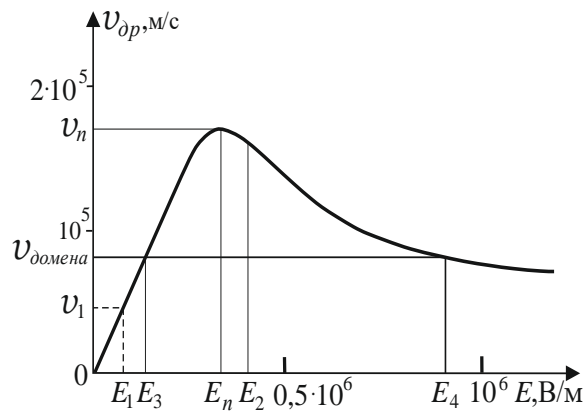


Рис. 1 Залежність $v_{др}(E)$.

При ще більш сильних полях $E \sim 10^7$ В/м поряд із порушенням умови $\Delta T_e \ll T_e$ порушується ще умова $v_{др} \ll v_0$. В такому полі електрони отримують за час вільного пробігу τ енергію, яка достатня для іонізації атомів появи додаткових носіїв заряду, тобто змінюється концентрація n . Залежність $v_{др}(E)$, яка показана на рисунку 1, дозволила пояснити ефект Ганна. В сильних електричних полях, коли $E > E_n$ (див. рис.) має місце “розігрів” електронного газу або утворення “гарячих” (нерівноважних) електронів в напівпровідниках, наприклад, GaAs або InP. Коли прикласти постійну напругу, яка перевищувала певне значення, щоб виконувалась умова $E > E_n$, струм через напівпровідник починав періодично змінюватись з часом. Інженери відразу зрозуміли, що відкриття Ганна означає появу нового напівпровідникового генератора, який може працювати в області надвисоких частот. Такі генератори були дуже потрібні у багатьох областях радіоелектроніки, зокрема – в радіолокації і системах зв’язку. Прилади на основі ефекту Ганна використовуються постами ДАІ для визначення швидкості автомобіля, в телевізійному мовленні через штучні супутники Землі.

Таким чином ми розглянули ряд фізичних причин, які приводять до порушення закону Ома в провідниках. В багатьох випадках таке порушення дозволило створити унікальні генератори, нелінійні елементи (діоди, транзистори), які широко використовуються в різних галузях науки та техніки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кучерук І.М., Горбачук І.І., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика й магнетизм.- К: Техніка, 2001.
2. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник / Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.–513с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>.