

Остренко В. С. Определение дополнения к значению теплового сопротивления силовых полупроводниковых приборов

Эта статья посвящена обоснованию методики определения дополнения к значению теплового сопротивления полупроводникового прибора для постоянного тока, которое дает возможность определить максимальную температуру полупроводниковой структуры прибора при нагружении импульсами тока.

Ключевые слова: силовой полупроводниковый прибор, импульсный режим, тепловое сопротивление, определение дополнения, температура структуры.

Ostrenko V. Determination of complement to the value of thermal resistance of power semiconductor devices

The author justifies the procedure for determining a complement to the value of thermal resistance of a direct current semiconductor device which permits to determine a maximum temperature of the device junction when loaded by current pulses.

Key words: power semiconductor device, pulse mode, thermal resistance, determination of complement, junction temperature.

УДК 537.523.5

А. В. Єршов д-р техн. наук, Г. І. Камель д-р техн. наук, І. М. Коцур канд. техн. наук

Запорізький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАОТИЧНОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРОНІВ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ У ПРИАНОДНІЙ ЗОНІ РОЗРЯДУ

Розглянуто вплив співвідношення густини розрядного та хаотичного електронних струмів на падіння потенціалу у дифузійній зоні прианодної області. Виконано аналіз впливу вимушеної конвекції на умови існування стійкого дифузного розряду на поверхні анода.

Ключові слова: електрон, іон, анод, падіння потенціалу, густина струму, розрядний струм, хаотичний струм, дифузійна зона, вимушена конвекція, дифузний розряд.

Проблема реалізації стійкого дифузного розряду на електродах технологічних пристроїв має значний науковий і практичний інтерес. Організація такого розряду дозволить знизити теплове навантаження й ерозію поверхні електродів, підвищити стабільність параметрів електродугових пристроїв і поліпшити якість процесів зварювання, наплавлення і плазмового напилювання.

Існуючі підходи для визначення умов переходу дифузного розряду в контрагований зв'язані з наявністю мінімуму електродного падіння потенціалу в залежності від щільності струму [1–7].

Однак складності теоретичного аналізу і недостатня точність експериментальних досліджень стримують одержання практичних рекомендацій. Сказане відноситься, насамперед, до вивчення прианодної зони розряду, де зміна потенціалу має не стрибкоподібний, а розподілений характер, що не враховано в приведених роботах. Тому, можна припустити, що існуючі методи теоретичної оцінки некоректні і вимагають подальшої розробки.

Ідея поліпшення теоретичного методу полягає в обліку сталості температури стовпа плазми при можливій зміні щільності струму в перехідній зоні. Завдання роботи полягає в розробці теоретичного методу розрахунку розподілу потенціалу у стовпі плазми перед анодом.

Дифузійна зона приелектродної області характеризується значною зміною температури і концентрації заряджених часток. Вона відділена від електрода шаром об'ємного заряду і є квазінейтральною. Причиною виникнення напруженості електричного поля є опір плазми, що зростає в приелектродній зоні, і існуючі градієнти концентрації заряджених часток. Розподіл потенціалу в дифузійній зоні знаходиться з рівнянь потоків дифузії заряджених часток у неоднорідній плазмі, а саме,

$$j_e = \frac{eD_e \cdot dn_e}{dy} - \frac{\sigma_e d\phi}{dy}, \quad (1)$$

$$j_i = -\frac{eD_i \cdot dn_i}{dy} - \frac{\sigma_i d\phi}{dy}, \quad (2)$$

де y – координата, що збігається з нормаллю до поверхні електрода; D_e і D_i – коефіцієнти дифузії електронів і іонів; σ_e і σ_i – коефіцієнти електропровідності, відповідно; e – заряд електрона; ϕ – потенціал плазми, n_e , n_i – концентрації електронів та іонів, j_e , j_i – густина струму електронів та іонів.

Оскільки в дифузійній зоні виконується умова квазінейтральності $n_i = n_e$, зміна потенціалу електричного поля знаходиться з наступного рівняння потоку дифузії електронів:

$$\frac{d\phi}{dy} = \frac{e \cdot D_e}{\sigma_e} \cdot \frac{dn_e}{dy} - \frac{j_e}{\sigma_e} \quad (3)$$

Припущення про сталість іонного струму в пристінній дифузійній зоні дозволяє вважати постійним також і струм дифузії електронів, що визначається градієнтом концентрації і дорівнює хаотичному струмові електронів на границі плазми, що описується рівнянням

$$j_{ex} = \frac{e \cdot n_e \cdot V_e}{4} = e \cdot D_e \frac{dn_e}{dy} = \text{const.} \quad (4)$$

де V_e – теплова швидкість електронів, j_{ex} – хаотичний струм електронів на границі плазми. Тоді із (3) і (4) зміна потенціалу в дифузійному шарі визначиться наступним співвідношенням розрядного і хаотичного струмів:

$$\frac{d\phi}{dy} = \frac{j_{ex}}{\sigma_e} \cdot \left(1 - \frac{j_e}{j_{ex}} \right)$$

При напрямку осі oy до анода дифузійний струм приводить до зниження потенціалу, а розрядний електронний струм – до підвищення, що варто врахувати й у формулі (3). При рівності розрядного і хаотичного струмів, градієнт потенціалу в дифузійному шарі дорівнює нулю.

Загальне спадання напруги в дифузійному шарі визначається різницею між омичною і дифузійною складовими падіння потенціалу

$$\Delta\phi = \Delta\phi_g + \Delta\phi_j = \Delta\phi_g \left(\frac{j_e}{j_{ex}} - 1 \right) \quad (5)$$

Для обчислення дифузійної складової падіння потенціалу використовуємо співвідношення Ейнштейна:

$$\frac{D_e}{\sigma_e} = \frac{k \cdot T_e}{e^2 \cdot n_e} \quad (6)$$

Величина дифузійного падіння потенціалу визначиться шляхом інтегрування першого доданка в (3) з урахуванням (6),

$$\Delta\phi_g = \int_{n_{eo}}^{n_{ew}} \frac{k \cdot T_e}{e \cdot n_e} \cdot dn_e = -\frac{kT_e}{e} \cdot \ln \frac{n_{eo}}{n_{ew}} \quad (7)$$

де n_{eo} і n_{ew} – концентрації електронів у квазірівноважній плазмі стовпа дуги і на границі з електродом,

відповідно, $\overline{T_e}$ – середня в пограничному шарі температура електронів.

Величину омичної складової падіння потенціалу можна визначити, згідно з (5), у залежності від дифузійної складової падіння потенціалу і співвідношення розрядного і хаотичного струмів електронів. Таким чином, омична складова падіння потенціалу визначиться з (5) і (7) рівнянням

$$\Delta\phi_j = -\Delta\phi_g \cdot \frac{j_e}{j_{ex}} = \frac{k \cdot T_e}{e} \cdot \frac{j_e}{j_{ex}} \ln \frac{n_{eo}}{n_{ew}} \quad (8)$$

З огляду на лінійний розподіл концентрації електронів і іонів у залежності від відстані від поверхні електрода й умови квазінейтральності, знаходимо, що пристінна концентрація електронів більше пристінної концентрації іонів на співвідношення довжин вільного пробігу електронів – l_e і іонів – l_i , що відокремлюють дифузійну зону від поверхні електрода. Сказане відповідає рівнянню

$$n_{ew} = \frac{j_i}{e \cdot V_{io}(T_e)} \cdot \frac{l_e}{l_i} \quad (9)$$

У формулі (9) враховано, що концентрація іонів зв'язана з хаотичним струмом іонів, що на границі шару дорівнює дифузійному струмові

$$j_{ix} = j_{iw} = e \cdot n_{iw} \cdot V_{io}(T_e) \quad (10)$$

Швидкість іонів на границі шару – V_{io} визначається відповідно до умови Бома в залежності від електронної температури, а саме,

$$V_{io} = \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{M_i}} \quad (11)$$

де M_i – маса іонів.

Необхідна для розрахунку падіння потенціалу в (8) величина хаотичного струму електронів визначиться в залежності від концентрації електронів на границі шару з рівняння (9) наступним чином:

$$j_{ex} = j_i \cdot \frac{l_e}{l_i} \cdot \frac{V_{eo}(T_e)}{V_{io}(T_e)} = j_i \cdot \frac{l_e}{4l_i} \sqrt{\frac{8M_i}{\pi \cdot m_e}} \quad (12)$$

Розрахункові оцінки показують, що негативна величина дифузійного падіння потенціалу складає від -5,5 до -3,5 В, зменшуючись по модулю зі зростанням струму в діапазоні від 10^6 до 10^7 А/м². Омична складова падіння потенціалу зменшується зі зростанням струму в зазначеному діапазоні від 4,5 до 2,5 вольт. Загальне падіння потенціалу негативно в межах 1 В, оскільки хаотичний струм електронів істотно перевершує струм розряду.

У залежності від впливу конвекції та умов контакту плазми з електродом існує можливість існування двох типів розряду: самостійного або несамостійного. Для самостійного розряду характерно зростання густини іонного та хаотичного електронного струму внаслідок

зростання температури плазми у стовпі розряду при зростанні густини струму розряду. Якщо при цьому зростання густини хаотичного електронного струму буде випереджати зростання густини струму розряду, то падіння потенціалу згідно із (5), (8) буде зменшуватись, внаслідок чого розряд стане нестійким та виникнуть анодні плями. Існування дифузного самостійного розряду із (8) можливе, якщо густина розрядного струму перевищує критичне значення і випереджає густину хаотичного електронного струму.

У випадку існування розвинутої конвекції плазми у каналі плазмотрона, густина хаотичного електронного струму буде визначатися сталою температурою плазми стовпа і густиною конвективного теплового струму. Тоді, згідно з (8), вольт амперна характеристика буде зростаючою, а розряд – дифузним. Розрахунки омичної складової анодного падіння потенціалу у [8] показано на рис. 1, на якому видно, що під дією конвективного теплового струму – q , при низькій густини розрядного струму з'являються ділянки зростання вольт амперної характеристики, які відповідають умовам дифузного розряду.

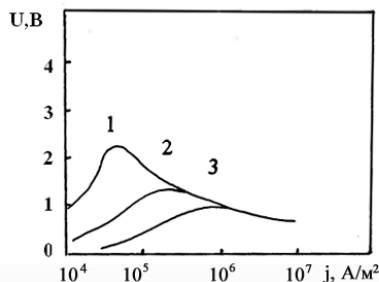


Рис. 1. Залежність омичного падіння потенціалу від густини розрядного струму – j , і конвективного теплового струму з плазми – q ; 1–3 відповідає $q = 10^5, 5 \cdot 10^5, 10^6$ Вт/м²

Висновки

1. Показано, що анодне падіння потенціалу у дифузійній зоні визначається співвідношенням розрядного і хаотичного електронних струмів на поверхні анода.
2. Визначено, що при існування розвинутої конвекції плазми у каналі плазмотрона, вольт амперна характе-

ристика буде зростаючою, а розряд – дифузним, навіть при порівняно невеликій густині розрядного струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дюжев Г.А. Анодные приэлектродные явления в дугах низкого и среднего давления при больших плотностях тока / Г. А. Дюжев, С. М. Школьник, В. Г. Юрьев // Тез. Всес. конф. по Г.Н.П. – Алма-Ата. – 1977. – С. 230–233.
2. Немчинский В. А. Прианодный слой сильноочной дуги высокого давления / В. А. Немчинский, Л. Н. Перетц // ЖТФ – 1977 – Т. 47. – № 9. – С. 1868. – 1875.
3. Дюжев Г. А. Анодные приэлектродные явления при больших плотностях тока / Г. А. Дюжев, С. М. Школьник, В. Г. Юрьев // ЖТФ – 1978 – Т. 48 – № 6. – С. 1195–1212.
4. Анодные процессы в сильноочном дуговом разряде / [Г. А. Дюжев, В. А. Немчинский, С. М. Школьник, В. Г. Юрьев] // Химия плазмы. – 1983. – № 10. – С. 169–209.
5. Дюжев Г. А. Множественная контракция анодной области дуги атмосферного давления / Г. А. Дюжев, Н. К. Митрофанов, С. М. Школьник // Тезисы докл. УШ Всес. конф. по физике низкотемпер. плазмы. – Ч. 1 – Минск, 1994. – С. 143–146.
6. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах / [М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров и др.]. – Новосибирск : Наука. 1982. – 157 с.
7. Кривцун И. В. О механизме контракции тока в анодной области дугового разряда / И. В. Кривцун, И. М. Парнега // Тезисы Междун. конф. «Физика дуги и источники питания». – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1992. – С. 24–25.
8. Ершов А. В. Влияние параметров несамостоятельного разряда на условия появления анодных пятен / А. В. Ершов // Электротехника и электроэнергетика – 2004. – № 2. – С. 20–22.

Стаття надійшла до редакції 26.10.2010

Ершов А. В., Камель Г. И., Коцур И. М. Исследование влияния хаотического потока электронов на параметры электрического поля в прианодной зоне разряда
Рассмотрено влияние соотношения плотности разрядного и хаотического электронных токов на падение потенциала в диффузионной зоне прианодной области. Выполнен анализ влияния вынужденной конвекции на условия существования устойчивого диффузного разряда на поверхности анода.

Ключевые слова: электрон, ион, анод, падение потенциала, плотность тока, разрядный ток, хаотический ток, диффузионная зона, вынужденная конвекция, диффузный разряд.

Ershov A., Camel G., Cotsur I. Investigation of the influence of chaotic electronic flux on parameters of electric field in the anode zone of a discharge

The influence of the ratio of the discharge density and chaotic electronic currents on the potential drop in the diffusion zone near the anode was considered. The analysis of the influence of forced convection on the conditions of existence of a stable diffuse discharge on the anode surface was performed.

Key words: electron, ion, anode, drop of potential, current density, diffusion zone, forced convection, diffuse discharge.