

12. Куницкий Ю.А. Высоко-температурные электродные материалы / Ю.А. Куницкий, Морозов В.В., Шлюко В.Я. ; под общ ред. Г.В. Самсонова. – К. : Вища школа, 1977. – 232 с.
13. Goebel D.M. Lanthanum hexaboride hollow cathode for dense plasma production / D.M. Goebel, J.T. Crow, A.T. Forrester // Rev. Sci. Instrum. – 1978. – V.49. – No.4. – P. 469–472.
14. Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки / А.Т. Форрестер. – М. : Мир, 1991. – 358 с.
15. Choi Y.-W. Development of a 30-kW Plasma Gun System With a Long Lifetime / Y.-W. Choi, Ch. Cho, Y.-S. Choi, K.-I. Lee, and J. Kim // IEEE Trans. on Plasma Science. – 2008. – V. 36. – No. 5. – P. 2765–2769.
16. Chu E. High-Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode for 10-to-50-kW Hall Thrusters / E. Chu, D. M. Goebel // IEEE Trans. on Plasma Science. – 2012. – V. 40. – No. 9. – P. 2133–2144.
17. Алексеев Г.И. Исследование свойств термоэммиттеров из LaB₆, изготовленных методом плазменного напыления / Г.И. Алексеев, И.Я. Аристова, И.К. Батрак, А.М. Бишаев, В.В. Морозов // Электронная техника, Сер. Материалы. – 1985. – № 8 (207). – С. 7–12.
18. Кузьмичёв А.И. Исследование поведения катодных материалов, содержащих включения эмиссионно-активной фазы, в режиме сверхплотного тлеющего разряда / А.И. Кузьмичёв, В.И. Крижановский, Г.В. Левченко, Р.Б. Лубан, А.И. Шендаков // Порошковая металлургия. – 1981. – № 1 (225). – С. 73–75.
19. Кузьмичёв А.И. Влияние включений LaB₆ в материале катода на его эрозию и параметры импульсного дугового разряда / А.И. Кузьмичёв, В.И. Крижановский, Г.В. Левченко, Р.Б. Лубан, А.И. Шендаков // Теплофизика высоких температур. – 1989. – Т. 27. – № 6. – С. 1219–1221.

Рецензія/Peer review : 20.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н. Котовський В.Й.

УДК 621.317; 537.523

В.А. ПОРЕВ, К.М. БОЖКО, С.Ю. СИДОРЕНКО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЗБУДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДЕФЕКТІВ

Досліджено умови та параметри збудження негативного імпульсного коронного розряду у повітрі. Запропоновано конструкцію газорозрядного пристрою на основі прозорого електроду для візуалізації дефектів у коронному розряді. Наведено результати контролю дефектів телевізійним засобом.

Ключові слова: імпульсний коронний розряд, газорозрядна візуалізація, телевізійна інформаційно-вимірвальна система.

V.A. POREV, K.M. BOZHKO, S.YU. SYDORENKO
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

EXCITED BY A PULSED CORONA DISCHARGE IN THE AIR FOR DEFECT VISUALIZATION

Studied the conditions and parameters of excitation negative pulse corona discharge in the air. The design of gas-discharge device for the visualization of defects in the corona. The results of monitoring defects television means.

Keywords: pulse corona discharge, gas discharge visualization, TV information and measuring system.

Вступ

Газорозрядна візуалізація побудована на ефекті збудження коронного розряду в просторі між двома електродами при подачі на них високої напруги. Теоретичний аналіз газового розряду взагалі і коронного розряду зокрема створює підґрунтя для розробки нових і вдосконалення вже існуючих засобів і методів контролю дефектів із застосуванням газорозрядної візуалізації. При цьому клас об'єктів контролю може бути також розширений відповідно до конструктивних особливостей газорозрядного пристрою, а також режиму збудження коронного розряду.

Фізичною моделлю, яка була однією з перших побудована на численних експериментах, є система електродів вістря-площина, в якій і розвивається газовий розряд. В цій системі один із електродів є загостреним і розташованим перпендикулярно до іншого електроду плоскої форми. На цій моделі базується сучасна теорія коронного розряду, а також створені реально діючі пристрої збудження корони.

Наше дослідження має на меті окреслити напрямки подальшого пошуку нових конструктивних і схемних рішень для газорозрядної візуалізації дефектів на основі імпульсного коронного розряду.

Представлена нами задача обмежена розглядом газового розряду, який збуджують в повітрі при атмосферному тиску. Газорозрядна візуалізація дефектів за такої умови має спрощену підготовку об'єктів до контролю та надає можливість реалізації їх масового (поточного) контролю в процесі виробництва. Крім того, стає можливим контроль поверхневих дефектів і в процесі експлуатації різного роду об'єктів.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Грунтовний аналіз фізичних процесів при збудженні коронного розряду в системі електродів вістря-площина наведено в [1, 2]. Розглянемо відповідно до [1] утворення від'ємної корони на вістрі у

повітрі. Розвиток процесу у часі розбі'ємо на кілька фаз.

У першій фазі при зростанні електричного поля від'ємного вістря до певної величини додатний іон при ударі об поверхню катоду може вибити вторинний електрон. Цей електрон починає віддалятися від вістря та іонізувати газ під час зіткнень. Утворюється електронна лавина.

Розглянемо особливості першої фази. В сильному полі поблизу вістря електрон є джерелом підсиленої іонізації, проте кумулятивний ефект лавини стає помітним лише після того, як вивільнені електрони пройдуть кілька дистанцій вільного пробігу від вістря. Кількість вивільнених електронів n залежить від відстані x :

$$n = \exp(\alpha x), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт розмноження електронів на одиницю довжини або перший коефіцієнт іонізації Таунсенда.

Відповідно до формули (1) лавинний струм має нескінченно зростати за експонентою при зростанні розрядного проміжку, проте цьому заважають супутні процеси.

Так, при віддаленні лавини, іонізуюче поле послаблюється з двох причин: по-перше, електричне поле швидко спадає із зростанням відстані, а по-друге, тому, що віддалені електрони залишають позаду себе малорухомі додатні іони, просторовий заряд яких послаблює електричне поле.

На початку другої фази електрони рухаються від вістря і залишають позаду хмаринку додатних іонів, густина яких спочатку за експонентою, а потім лінійно спадає по мірі віддалення від вістря. Затримані іонним просторовим зарядом електрони гальмують і прилипають до молекул кисню, утворюючи повільні від'ємні іони, які дрейфують до додатного електроду.

Електричне поле між поверхнею вістря та додатним просторовим зарядом накладається на поле розрядного проміжку, яке діє на електрони поблизу вістря. Додатні іони сягають катоду і кількість емітованих з нього електронів збільшується, що викликає появу нових лавин. Утворені лавини збільшують як іонізацію, так і просторовий заряд поблизу катоду, а також значно зменшують іонізацію у об'ємі подалі від вістря – за додатним просторовим зарядом. Тим часом, додатний просторовий заряд повільно рухається у напрямі до поверхні катоду.

При переході до третьої фази утворення послідовних лавин супроводжується розповсюдженням лавин по поверхні внаслідок їх бічного руху. В третій фазі просторовий заряд сягає катоду і процес іонізації практично припиняється після того, як додатні іони віддадуть свій заряд катоду.

В четвертій фазі електричне поле знову підсилюється внаслідок ліквідації додатних іонів, останні з яких дають початок новим електронним лавинам і створюються умови для повторного збудження коронного розряду. Знову починається його перша фаза.

Внаслідок утворення і руху просторового заряду виникають пульсації струму і ми спостерігаємо періодичні розряди. Частота пульсацій знаходиться в діапазоні від 5 000 до 200 000 Гц. Оцінка часу, необхідного для утворення лавини, дає значення 2-3 нс.

Для бічного і послідовного розповсюдження лавин необхідно від 10 до 100 нс. За той самий час просторовий додатний заряд сягає катоду.

Вістря у дослідах мали діаметр від 0,03 мм до 4,7 мм при розрядному проміжку 6 см. Напруженість поля була задана в діапазоні від 0 до 25 кВ/см. Кількість електронів в окремих лавинах зростала від 10 для найбільшого вістря до 10 000 для найменшого вістря.

Одночасно із іонізацією значна кількість атомів збуджується електронами і випромінює фотони. Випромінювання має пурпурні кольори що свідчить про іонізацію азоту та окису азоту. Спостерігають так званий «іскровий спектр» повітря біля катоду.

У [2] надано схему, запропоновану Тричелом (рис. 1), для вимірювання струму і напруги коронного розряду, для чого послідовно з розрядним проміжком вмикають опір $R1 = 1$ кОм та паралельне коло із опорів $R3, R4$. З додаткового послідовного опору $R2 = 10$ кОм знімають сигнал від струму корони для подальшого підсилення і осцилографічного контролю імпульсів струму. Встановлено, що струм корони в повітрі при малих величинах складається із серії регулярних імпульсів, частота яких лінійно зростає із зростанням середнього значення струму і дорівнює 50 кГц при струмі 10 мкА та 100 кГц при 20 мкА. Частота імпульсів мало залежить від довжини розрядного проміжку для даного вістря, проте значно збільшується із зменшенням радіусу півсферичного кінця вістря.

Імпульс, отриманий у вигляді стрибка напруги на опорі, який ввімкнено послідовно із коронним проміжком, може бути викликаним не тільки струмом провідності, але і струмом зміщення [2]. Для розрахунку струму зміщення необхідно попередньо визначити електричну ємність між додатним і від'ємним електродами розрядного пристрою. Ємність може дорівнювати 10 пФ і більше. Для окремого коронного розряду із напругою 10 кВ і струмом у 100 мкА складова струму зміщення дорівнює складовій струму провідності вже при частоті імпульсів $f = 200$ Гц. При зменшенні загального струму розряду струм зміщення може значно перевищувати струм провідності на частотах $f < 200$ Гц.

В [2] наведено мінімальну напруженість поля, при якій виникає від'ємна корона у повітрі для розрядного проміжку 0,5-8 см. Так, для вістря з радіусом 0,47 мм необхідна напруженість поля дорівнює 6 200 В/см, для вістря з радіусом 0,05 мм вона дорівнює 17 300 В/см і для вістря з радіусом 0,012 мм напруженість поля складає 38 000 В/см. При цьому ми нехтуємо залежністю напруженості від ширини розрядного проміжку, оскільки відносна похибка при такому припущенні не перевищує 2%.

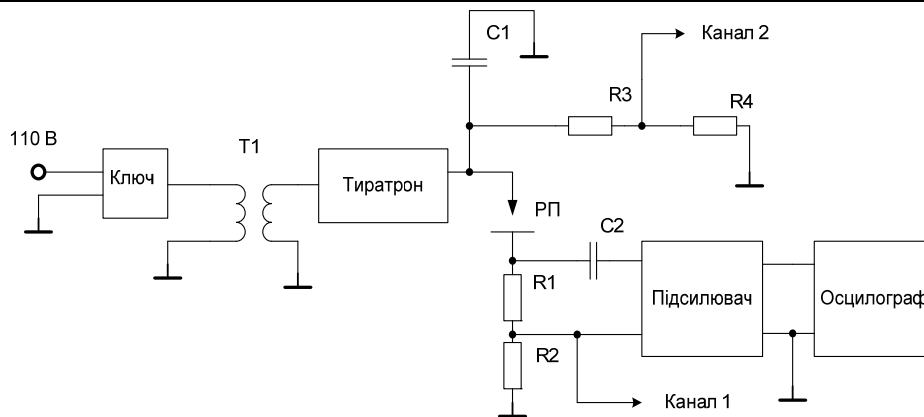


Рис. 1. Схема Тричела для дослідження від'ємної корони в системі вістря-площина: РП – розрядний пристрій; канал 1 – коло вимірювання струму; канал 2 – коло вимірювання напруги; Т1 – імпульсний трансформатор; С1 – розрядна високовольтна ємність; С2 – прохідна ємність для фільтрації постійної складової сигналу

Для системи коаксиальних електродів (дріт – циліндрична труба) отримані вольт-амперні характеристики від'ємного коронного розряду у повітрі, які мають вигляд прямих ліній [3]. Там же наведено величину активного опору розряду, яка дорівнює 60 кОм при тиску в 1/6 від атмосферного. Для системи електродів вістря-площина слід також очікувати наближеної до лінійної залежності для вольт-амперної характеристики розряду.

При зростанні напруги коронний розряд переходить у іскровий розряд, коли між електродами виникає пробій і проскакує іскра. Якщо після гасіння розряду напруга на електродах відновлюється, то пробій повторюється. Цей процес є характерним для періодично-імпульсного методу збудження розряду. Якщо джерело живлення має достатню потужність і може забезпечити протікання сильного струму тривалий час, то від струму іскри виникає катодна пляма і підпалюється дуговий розряд. Взагалі стан плазми у сформованому каналі навіть для швидкоплинного іскрового розряду схожий на стан у стовпці дуги, тому деякі автори розглядають кінцеву стадію іскрового розряду як імпульсну дугу [4].

Першою стадією іскрового розряду і стадією розвитку коронного розряду в іскровий є процес стримерного пробію. Основи стримерної теорії закладено в роботах [1, 2, 5], яка базується на уявленні про появу і зростання між електродами тонкого іонізованого каналу – стримера (від stream – потік), який прокладає собі шлях услід першої потужної лавини. У цей слід втягуються електрони вторинних лавин. Лавини зароджуються поблизу сліду від електронів, які вивільняються під дією фотонів, що випромінюють збуджені при проходженні першої і вторинних лавин атоми.

На комплексний характер механізму іскрового пробію вказує Петер [5], який розділяє механізм генерації великої кількості (приблизно 100) лавин (таунсендівський механізм) та швидкий механізм, при якому вже перша лавина викликає стримерний або каналний механізм. Проте, існують і варіації цих форм, які є перехідними між обома механізмами.

Процес утворення лавин та розвитку корони через стримерну фазу до іскрового розряду для різних газів та їх сумішей при різному тиску досліджено Петером [5] в камері Вільсона. Через кварцове вікно камери вимірювали часові параметри процесу із використанням електрооптичного затвору Керра та швидкісного фотоапарату. Мік та Крегс [2] досліджували іскровий розряд за допомогою фотопомножувача та осцилографа. Була виміряна швидкість розповсюдження стримерів в повітрі, яка змінювалась від $1,4 \cdot 10^6$ м/с для проміжку в 2 см до $6,6 \cdot 10^6$ м/с для проміжку в 12 см. Іскровий канал повністю формується за 53 нс. Час світіння імпульсної корони дорівнює 0,5 мкс.

Осцилограми струму в умовах стримерного пробію повітря при ширині розрядного проміжку 9 см виявили наступний ефект [5]. Після короткого піку від першої лавини протягом 10 мкс тече малий «запізнений» струм (як встановлено, він переноситься електронами). Осцилограма завершується стрибкоподібним зростанням струму – пробієм. Затримка у виникненні стримера і пробію пов'язана із прилипанням, внаслідок якого виникають від'ємні іони, які компенсують значною мірою додатний заряд іонного сліду стримера. Потім електрони відлипають і виникає запізнений струм.

Характеристики стримерів, які розвиваються від додатного та від'ємного електродів на поверхні фотопластинки при одночасному контакті їх з нею, вивчають за фігурами Ліхтенберга, що утворюються в емульсійному шарі фотопластинки [2]. Цей тип розряду віднесено до поверхневого коронного, який збуджують при подачі імпульсної напруги на електроди. Поверхневий коронний розряд ковзає уздовж діелектрика (ебоніту, скла) і виникає, коли один із електродів, наприклад, у формі стрижня, має опору на діелектричну пластину, а інший електрод – металева обкладинка на її протилежній стороні. Розвинені розрядні канали в газі притискаються до діелектрика, розбігаються від стрижня і обтікають пластину до обкладинки на її протилежній стороні.

При застосуванні плоско-паралельних електродів на високих частотах виникає високочастотний ємнісний розряд, який внаслідок пробію може бути високоточним [5]. У випадку середнього та високого тиску та достатньо високої частоти поля електрони мають велику кількість ударів з молекулами газу та

дрейфують у вигляді хмаринки в фазі з полем. Таким чином, розрядний струм може бути модульованим високою частотою. При збільшенні напруги виникає пробій. Френсіс наводить середньоквадратичне значення високочастотної напруги пробією для повітря при атмосферному тиску в межах 800-1000 В для розрядного проміжку 0,1-0,5 мм [6]. На жаль, він не надає точного значення частоти, яку ми можемо оцінити приблизно у 2–10 МГц і вище.

Як зазначалось вище, іскровий розряд є результатом розвитку коронного розряду. Математичні моделі іскрового розряду наведено у [7]. Ці моделі побудовано на основі уявлень про стримерний механізм розвитку розряду. Новим важливим внеском до стримерної теорії став розгляд стримера як хвилі іонізації.

Структуру іскрового розряду в повітрі для розрядних проміжків з довжиною у кілька метрів при постійній напрузі досліджено в [8]. Там же наведено мінімальну напруженість електричного поля, за якої можливий розвиток електронної лавини, а саме 23 кВ/см. Розвиток лавини, як ми знаємо, є необхідною умовою утворення корони. В структурі іскрового заряду виділено новий важливий рухомий елемент, від якого відділяються стримери. Цей елемент названо лідером. Для опису іскрового розряду та пробією створено теорію стримерно-лідерного переходу.

Загальна картина розвитку імпульсного пробією газів, наведена в [9]. При цьому разом із стримерним важливим механізмом пробією визначено об'ємний (таунсендівський) пробій, якому і присвячено більшу частину дослідження.

Газорозрядний метод візуалізації на основі застосування рідкого прозорого електроду (електроліт у кварцовій кюветі) розглянуто в [10]. Застосовані тут підходи до отримання і розшифрування зображень, на наш погляд, можуть бути корисними при розробці і використанні розрядного пристрою на основі тонко плівкового прозорого електроду на склі.

Перспективними об'єктами контролю методом газорозрядної візуалізації є мікродропи та нитки з провідних та діелектричних матеріалів [11]. Досі єдиним конструктивним рішенням для розрядного пристрою вважали систему електродів нитка-циліндр. На нашу думку, зручним інструментом контролю ниткоподібних об'єктів може бути система плоских електродів, один із яких є тонко плівковий прозорий електрод на склі.

В сучасних працях з високовольних технологій [12–16] узагальнено досвід попередніх дослідників фізики газового розряду та додано результати розв'язання спеціальних задач.

Підсумовуючи наведений короткий огляд, на нашу думку, можна зробити такі висновки:

- коронний розряд розвивається у іскровий і його необхідно розглядати у зв'язку із іскровим пробією на основі теорії лавин та стримерів;
- складність процесу протікання та різноманітність умов збудження спонукає до пошуку нових і вдосконалення вже існуючих методів і засобів вимірювання параметрів коронного розряду;
- візуалізація коронного розряду є основою для застосування телевізійного методу, проте одночасно з цим доцільним є осцилографічне вимірювання електричних і часових параметрів, тобто можливий комплексний підхід до створення інструментально-методичної бази досліджень коронного розряду.

Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження – процес збудження коронного розряду для газорозрядної візуалізації дефектів.

Мета дослідження – вдосконалення конструкції газорозрядного пристрою та пошук оптимального режиму збудження коронного розряду..

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Виконати аналіз конструктивних рішень існуючих пристроїв збудження коронного розряду для газорозрядної візуалізації.
2. Окреслити можливості нових конструктивних і схемних рішень для задач комплексного контролю дефектів телевізійним і осцилографічним методами на основі збудження коронного розряду.
3. Здійснити експериментальну перевірку нових рішень на реальному макетному зразку.
4. Визначити напрями наступних досліджень.

Газорозрядний пристрій із рідким прозорим електродом та аналіз його недоліків

Для отримання зображень збудженої корони у фронтальній площині об'єкту дослідження верхній електрод виконують прозорим. До нашого часу в деталях відпрацьована технологія рідкого електроду на основі електроліту, розміщеного у прозорій кюветі, та створені математичні моделі протікання струму через механізм пробією у діелектрику [10]. Також розроблена теорія для системи плоских електродів, які відокремлені від розрядного проміжку шаром діелектрика [4]. Розглянемо конструкцію та характеристики системи із рідким електродом на конкретних прикладах.

Розрядно-оптичний пристрій на основі рідкого електроду (прозорої кювети із кварцового скла, заповненої електролітом) був розроблений для контролю дефектів кремнієвих пластин [17]. Пристрій (Рис. 2) містить оптичну систему у вигляді фокону (5), входним торцем якого є рідкий струмопровідний електрод (2), оптично прозорий в обраному діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання, діаметром не менше діаметра досліджуваної пластини, відділений від навколишнього середовища скляним розрядним проміжком (3). Вихідна площина фокону (6) межує зі світловодом (7). Сигнал з генератора напруги надходить до рідкого електроду через контакт (4). Вся конструкція змонтована у корпусі (7).

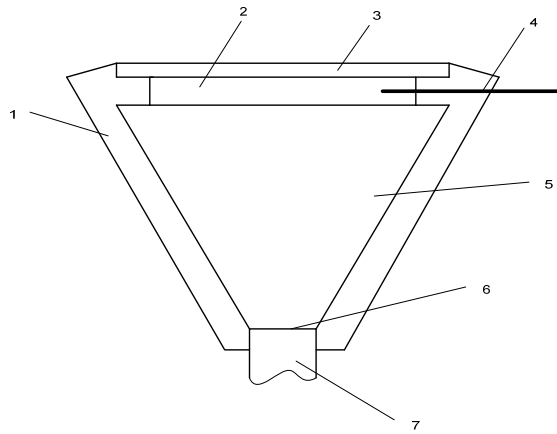


Рис. 2. Схема розрядно-оптичного пристрою для загального (інтегрального) аналізу якості пластин із монокристалічного кремнію: конструкція типу «фокон»

Об'єктом контролю тут є пластини кремнію. Попереднє калібрування установки здійснюється на еталонній пластині, яка не має дефектів. Досліджувана пластинка розміщується на склі у розрядному проміжку, при цьому фіксується оптична потужність, що генерується нею в умовах накладеного поля, яка потім порівнюється з еталонною [17].

Похибка вимірювань визначається точністю вимірювача потужності оптичного випромінювання і становить $\pm 15\%$ з довірчою ймовірністю $P = 0,95$. Тривалість контролю - кілька секунд.

В [17] було визначено, що найбільш різке зображення неоднорідностей на фотопластині отримують при величині розрядного проміжку від 40 мкм до 3,2 мм і амплітуді напруги від 6 до 13,5 кВ. Частота імпульсів дорівнювала 20 ± 5 кгц.

Аналіз конструкції та принципу дії розрядно-оптичних пристроїв на основі рідкого електроду висвітлює такі недоліки:

- мале поле зору та необхідність сканування поверхні об'єкту дослідження;
- складність конструкції через наявність кювети із рідиною та проблематичність створення мобільного варіанту приладу;
- збільшення похибки вимірювання через введення до оптичного тракту додаткових елементів;
- складність математичної моделі протікання струму через наявність в колі двох шарів діелектрика та електроліту.

Збудження імпульсного коронного розряду в пристрої з тонко плівковим прозорим електродом

Зазначені вище недоліки системи із рідким електродом спонукали до пошуку конструкції із «сухим» прозорим електродом на основі тонкої плівки окису індію (ITO – indium thin oxide). Для пошуку режимів збудження корони було створено макетний зразок спрощеної конструкції, де високовольтний електрод має точковий контакт із плівкою ITO, а низьковольтний (заземлений) електрод із мідної фольги наклеєний на протилежний бік скляної пластини. Між заземленим електродом і склом утворюється тонкий (10–200 мкм) повітряний простір, у якому збуджується імпульсний коронний розряд (рис. 3).

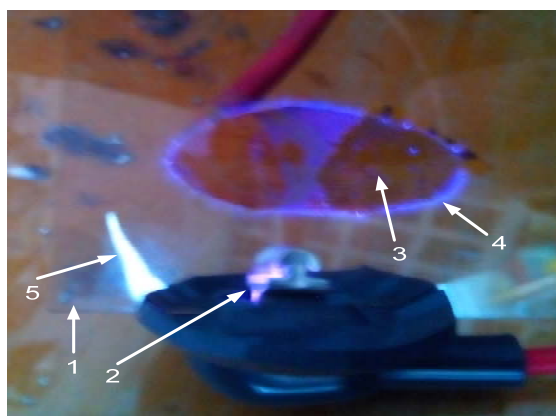


Рис. 3. Збудження коронного розряду в системі із тонко плівковим прозорим електродом: 1 – скляна пластинка із нанесеним прозорим електродом ITO (indium thin oxide); 2 – високовольтний додатний електрод, прикладений до прозорого електроду; 3 – від'ємний заземлений мідний електрод, наклеєний на скляну пластинку; 4 – корона на границі мідного електроду; 5 – поверхневий іскровий розряд, який розвивається в дугу

Коронний розряд виникає над тими місцями поверхні, де є механічні ушкодження, внаслідок яких створюється неоднорідність електричного поля із великою напруженістю ($E \geq 30$ кВ/см). Таку напруженість створює структура поверхні, яку можна представити як сукупність загострених мікроскопічних голочок.

Таким чином, систему плоско-паралельних електродів можна розглядати як систему множини вістер і площини. Для побудови моделі такої складної системи, на нашу думку, придатна модель вістря-площина, детальний розгляд якої наведено в [18].

Коронний розряд може супроводжувати поверхневий іскровий розряд, який при великому струмі переростає в дуговий розряд (рис. 3). Це викликає необхідність пошуку таких режимів збудження коронного розряду, які запобігають від виникнення дуги.

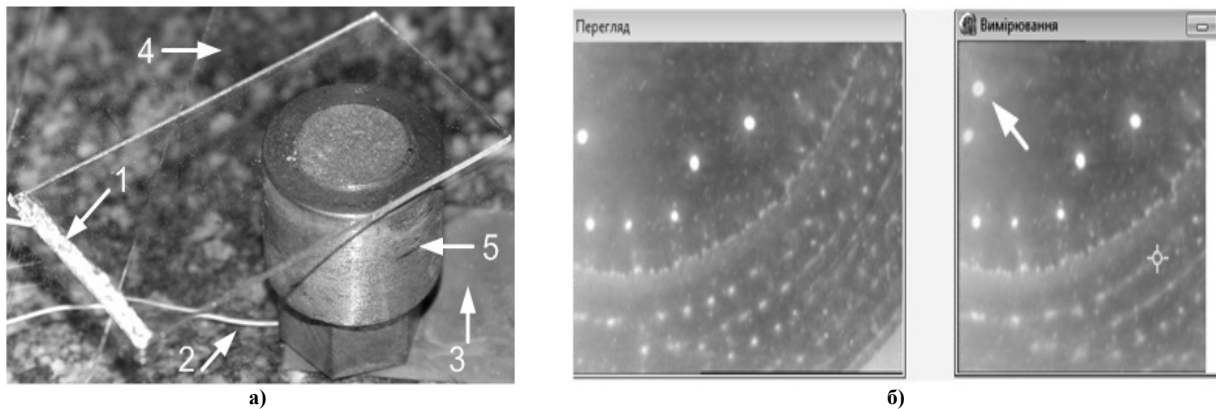


Рис. 4. процес газорозрядної візуалізації зруйнованого штоку вузла впорскування термопластавтомату: а) розрядний пристрій: 1- прозорий електрод із напаяною шиною; 2 – шина заземлення; 3 – негативний електрод; 4 – ізолююче скло; 5 – об’єкт контролю; б) – коронний розряд над дефектами поверхні, що мають загострену форму, зображення отримане у вікні програми OwlEye: стрілка вказує на рухомий іскровий розряд

Нами досліджено коронний розряд над поверхнею зруйнованого штоку вузла впорскування термопластавтомату. Поверхня має численні дефекти, які утворюють множину загострених мікроконусів. Отримано також телевізійні зображення корони (рис. 4), які потім були оброблені програмою OwlEye.

При цьому режим збудження коронного розряду мав такі особливості: імпульсну напругу збудження зменшено до 900–1200 В при частоті імпульсів 8 кГц та шпаруватості 4-4,5;

Електрична схема пристрою збудження коронного розряду побудована на імпульсному високовольтному трансформаторі, первинна обмотка якого є навантаженням для колекторного кола потужного високовольтного транзистора (IGBT). Імпульси на затвор транзистора ідуть від генератора на таймері NE555. Вторинна обмотка трансформатора з’єднана із електродами розрядного пристрою.

Наступні модифікації схеми збудження дозволили виміряти струм розряду і його часові параметри. Схема вимірювання в основному повторювала схему Тричела (рис. 1). В результаті отримано осцилограми струму розряду і напруги на виході трансформатору (рис. 5).

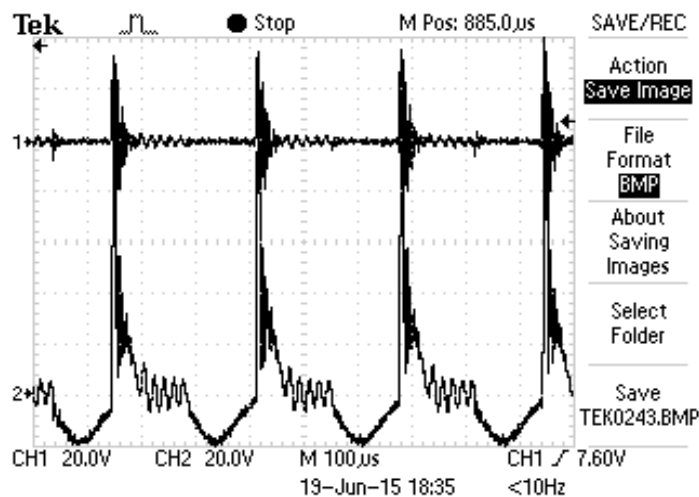


Рис. 5. Осцилограми струму коронного розряду (канал 1) і напруги на виході імпульсного трансформатора (канал 2)

Струм коронного розряду має пульсуючу форму із зміною полярності та спадаючою амплітудою. Частота коливань дорівнює 140 кГц. Імпульс із найбільшою амплітудою у 75 мА утворюється при вимиканні транзисторного ключа в колі високовольтного трансформатора. Частота вмикання ключа та збудження розряду була незмінною і дорівнювала 8 кГц.

Обговорення результатів та напрямку наступних досліджень

В результаті проведених досліджень створено діючий макет пристрою імпульсного збудження коронного розряду на основі системи плоско-паралельних електродів, один із яких є прозорим. В конструкції пристрою застосовано тонко плівковий прозорий електрод, який утворено методом вакуумного

напилення на скляну підкладку.

Схема пристрою придатна для осцилографічного контролю. Отримані осцилограми струму розряду дозволили виміряти амплітуду і частоту розрядного струму.

Розроблений пристрій є платформою для створення модуля газорозрядної візуалізації у складі телевізійної вимірювальної системи. Разом із осцилографічним, телевізійний метод утворює основу інструментально-методичного комплексу для контролю поверхневих дефектів та вимірювання їх параметрів.

Основними задачами наступних досліджень, на нашу думку, є:

- пониження напруги збудження коронного розряду;
- визначення оптимальної частоти, шпаруватості та крутизни імпульсів збудження розряду;
- регулювання і придушення іскрового розряду, у який розвивається коронний розряд;
- запобігання збудження поверхневого іскрового та дугового розрядів;
- визначення залежності розрядного струму від яскравості корони;
- створення математичної моделі в системі вістря-площина для множини загострених електродів та із врахуванням діелектричного шару в розрядному проміжку;
- розробка мобільного засобу контролю.

Висновки

На основі аналізу джерел з фізики коронного розряду, визначено напрями вдосконалення розрядно-оптичних пристроїв. Зокрема, на основі імпульсного збудження розряду та застосування «сухого» прозорого електроду створено діючий макет пристрою для застосування в газорозрядній візуалізації дефектів.

На наш погляд, методи і засоби газорозрядної візуалізації можуть вийти на новий рівень за своїми функціональними можливості при застосуванні їх у комплексі з телевізійними і осцилографічними методами і засобами. Таким чином, є підґрунтя для створення контрольно-вимірювального комплексу, основою якого можуть стати вже існуючі телевізійні інформаційно-вимірювальні системи.

Експериментально підтверджено коливальний характер струму коронного розряду при імпульсному збудженні. Наголошено про необхідність створення нової моделі коронного розряду на основі системи із множини голок (вістер) і площини.

Література

1. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах / Леб Л. – М. : Гос. тех. издат., 1950. – 672 с.
2. Мик Дж. Электрический пробой в газах / Дж. Мик, Дж. Крэгс. – М. : Изд. иностр. лит., 1960. – 608 с.
3. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда / Браун С. – М. : Атомиздат, 1961. – 324 с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Райзер Ю.П. – М. : Наука, 1992. – 536 с.
5. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах / Петер Г. – М. : Мир, 1968. – 392 с.
6. Френсис Г. Ионизационные явления в газах / Френсис Г. – М. : Атомиздат, 1964. – 303 с.
7. Лозанский Э.Д. Теория искры / Э.Д. Лозанский, О.Б. Фирсов. – М. : Атомиздат, 1975. – 272 с.
8. Базелян Э.М. Искровой разряд в воздухе / Э.М. Базелян, И.М. Ражанский. – М.: Наука, 1988. – 164 с.
9. Королев Ю.Д. Физика импульсного пробоя газов / Ю.Д. Королев, Г.А. Месяц. – М. : Наука, 1991. – 224 с.
10. Кожаринов В.В. Электроразрядный метод визуализации / В.В. Кожаринов, Н.Н. Зацепин, Н.Е. Домород. – Минск, 1986. – 134 с.
11. Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах / Бахтаев Ш.А. – Алма-Ата, 1984. – 208 с.
12. Базелян Э.М. Искровой разряд. / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М. : Изд. МФТИ, 1997. – 320 с.
13. Reizer Ju.P. Gas Discharge Physics. Springer. 2001. 449 p.
14. Kuffel E. High Voltage Engineering / E. Kuffel, W. Zaengl, J. Kuffel. – Oxford : Newnes, 2000. – 539 p.
15. Naidu M. High Voltage Engineering / M. Naidu, V. Kamaraju. – New York : McGraw-Hill, 1996. – 378 p.
16. Advances in High Voltage Engineering. Ed. by Haddad A. and Warne D. IET. – 552 p.
17. Добровольский Ю.Г. Использование эффекта Кириана для контроля качества полупроводниковых пластин / Ю.Г. Добровольский // ТКЭА. – 1999. – № 5-6. – С. 22–24.
18. Болтачев Г.Ш. Аналитическая модель коронного разряда с конического электрода в режиме насыщения / Г.Ш. Болтачев, Н.М. Зубарев // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, вып. 11. – С. 28–37.

Рецензія/Peer review : 10.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 6.12.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією