

04;06;10;11

Модификация приповерхностных слоев медной фольги при воздействии объемным наносекундным разрядом в воздухе атмосферного давления

© М.А. Шулепов, В.Ф. Тарасенко, И.М. Гончаренко,
Н.Н. Коваль, И.Д. Костыря

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2007 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований модификации приповерхностных слоев фольги из меди после воздействия плазмы объемного разряда. Объемный разряд в воздухе атмосферного давления формировался при подаче на электрод с малым радиусом кривизны импульсов высокого напряжения наносекундной длительности, отрицательной и положительной полярности. Показано, что при обработке фольги ее поверхностный слой в центральной области очищается от углерода, а атомы кислорода проникают в медную фольгу, причем глубина очистки зависит от полярности импульсов напряжения. При положительной полярности электрода из фольги очистка наблюдается на глубине свыше 50 nm, а атомы кислорода проникают в медную фольгу на глубину до 25 nm.

PACS: 52.77.Bn, 52.40.Hf

В настоящее время разряды различных типов и электронные пучки широко используются для модификации приповерхностных слоев различных материалов [1]. Известно также о применении высоковольтного диффузного разряда низкого давления и малой мощности для инактивации микробиологических культур [2]. В [3] была показана возможность формирования в неоднородном электрическом поле объемного разряда при атмосферном давлении. На промежутке, заполненный воздухом, подавались импульсы высокого напряжения (~ 100 kV) наносекундной длительности. Особенностью подобных разрядов является генерация при разряде в воздухе атмосферного давления рентгеновского излучения [3–5] и пучков убегающих электронов [5].

В последние годы было показано, что в воздухе атмосферного давления и неоднородном электрическом поле объемный разряд формируется при обеих полярностях импульса напряжения на электроде с малым радиусом кривизны [6,7]. Другой особенностью разряда в неоднородном электрическом поле (объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ)) является возможность реализации высоких удельных мощностей энерговыклада (до 800 MW/cm^3 [8]). При этом из разрядной плазмы генерируются пучки убегающих электронов с амплитудой тока за фольгой в десятки-сотни ампер, а длительность импульса тока пучка на полувысоте не превышает 100 ps [9]. Подобные разряды в инертных газах являются и источниками мощного ВУФ-излучения [10]. Таким образом, при формировании ОРИПЭЛ на анод оказывается комплексное воздействие плазмы плотного наносекундного разряда с удельной мощностью энерговыклада в сотни мегаватт на кубический сантиметр, сверхкороткого электронного пучка с широким энергетическим спектром и оптического излучения различных спектральных диапазонов (в том числе УФ и ВУФ) из плазмы разряда.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать модификацию приповерхностных слоев медной фольги после воздействия плазмы объемного разряда (ОРИПЭЛ).

Возбуждение газа осуществлялось в камере, конструкция которой показана на рис. 1. Расстояние между плоским анодом из медной фольги и трубчатым катодом равнялось $8\text{--}16 \text{ mm}$. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220, формировавший импульсы напряжения с амплитудой $\sim 230 \text{ kV}$ (напряжение холостого хода), длительностью импульса на полувысоте $\sim 2 \text{ ns}$ (на согласованной нагрузке) и временем нарастания $\sim 0.5 \text{ ns}$ [11]. В генераторе была предусмотрена возможность изменения полярности импульсов напряжения на потенциальном электроде. Регистрация тока разряда осуществлялась с помощью токового шунта из чип-резисторов, установленного между анодом и корпусом разрядной камеры. Измерения показали, что амплитуда тока разряда при обеих полярностях импульса напряжения составляла $\sim 3 \text{ kA}$, а полная длительность импульса тока разряда $\sim 30 \text{ ns}$ (длительность первого полупериода тока разряда $\sim 8 \text{ ns}$).

При отрицательной полярности на электроде с малым радиусом кривизны газовый диод генерировал пучок убегающих электронов. Ток пучка электронов регистрировался в данных условиях с помощью

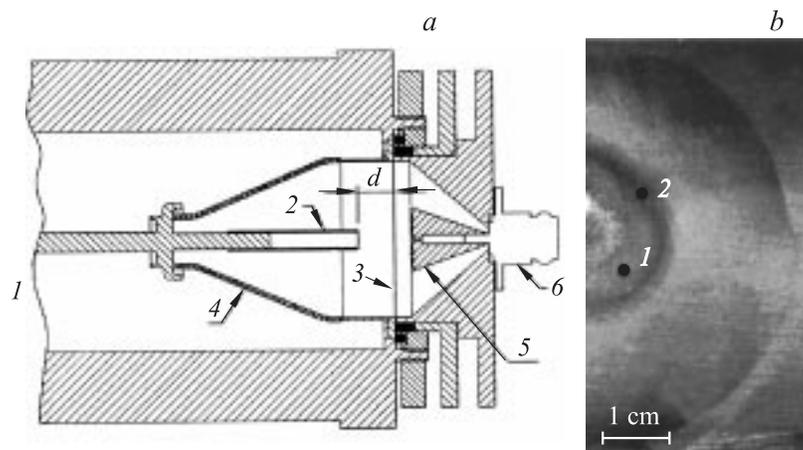


Рис. 1. *a* — конструкция газового диода и коллектора: 1 — место подключения генератора, 2 — катод, 3 — анод, 4 — изолятор, 5 — приемный конус коллектора, 6 — разъем. *b* — образец из медной фольги (показана его половина) после воздействия плазмы разряда и пучка убегających электронов. Зазор между катодом и фольгой 11 мм. Анализ методом оже-спектроскопии проводился в областях 1 и 2.

коллектора, который показан на рис. 1. Для измерения параметров пучка электронов, медная фольга заменялась на AlBe фольгу толщиной $45 \mu\text{m}$. Амплитуда тока пучка при регистрации электронов с энергией более 70 keV и регистрируемой длительности импульса тока пучка на полувысоте $\sim 0.1 \text{ ns}$, которая соответствовала разрешению используемого коллектора, составила $\sim 10 \text{ A}$. Распределение электронов по энергиям, полученное в воздухе атмосферного давления для подобного газового диода, приведено в [9,12]. В спектре данного газового диода были зарегистрированы электроны с энергиями от 40 до 180 keV . Электроны с энергией менее 40 keV методом, используемым в [9,12], не определялись, тогда как, согласно расчетам [13,14], в разрядной плазме генерируется значительное число электронов с энергией менее 40 keV .

Облучение образцов проводилось в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 1 Hz . После облучения образцы, с помощью оже-спектроскопии, исследовались на предмет изменения химического состава поверхности.

Фотография поверхности медной фольги толщиной $100\ \mu\text{m}$ после воздействия 300 импульсами показана на рис. 1, *b*. На автографе можно выделить три характерные области. Первая область диаметром $\sim 16\ \text{mm}$ соответствует диаметру плотной плазмы объемного разряда на фольге (точка 1). В первой области ближе к центру видно кольцо из более ярких точек, которые являются следствием контрагирования разряда в отдельных импульсах при межэлектродном зазоре $11\ \text{mm}$. При увеличении межэлектродного зазора до $14\text{--}16\ \text{mm}$, разряд был объемным, но плотность тока разряда и пучка убегающих электронов уменьшалась.

Далее следует область в виде темного кольца с шириной $\sim 2\ \text{mm}$ (точка 2). За ней находится периферийная зона, в которой плотность тока разряда и пучка электронов (при положительной полярности фольги) были малы. Результаты исследований модификации поверхности фольги из меди представлены на рис. 2. Здесь приведены профили содержания углерода (рис. 2, *a*) и кислорода (рис. 2, *b*) по глубине, полученные с помощью оже-спектрометра. Анализ химического состава приповерхностного слоя проводился в двух точках каждого образца (рис. 1, *b*): в области максимального воздействия (точка 1) и в области наибольшего изменения цвета поверхности (точка 2). Видно, что воздействие ОРИПЭЛ привело к очистке поверхности медной фольги от углерода (точка 1) и к увеличению концентрации кислорода в приповерхностном слое (точки 1 и 2). Наибольший эффект наблюдался при подаче на электрод с малым радиусом кривизны импульсов напряжения отрицательной полярности (кривые 3, рис. 2). В этом случае на медную фольгу оказывали воздействие не только плазма разряда и излучение из нее, но и убегающие электроны с различными энергиями (от единиц до сотен keV). Очистка от углерода по сравнению с исходным образцом (кривая 1) наблюдалась до глубин свыше $50\ \text{nm}$ (рис. 2, *a*). Также существенно по сравнению с исходным образцом (кривая 1) увеличилась концентрация кислорода по глубине до $25\ \text{nm}$ (рис. 2, *b*).

Данные оже-спектроскопии показывают, что концентрация кислорода в приповерхностном слое увеличилась как в точке 1, так и в точке 2. Тогда как концентрация углерода на глубине до $10\ \text{nm}$ в точке 1 и точке 2 существенно отличается. Максимальная концентрация углерода в точке 2 (кривая 4) после обработки превышает концентрацию углерода в точке 1 (кривая 2) в 4 раза (рис. 2, *a*). Кроме того, концентрация углерода в точке 2 более чем в два раза превышает

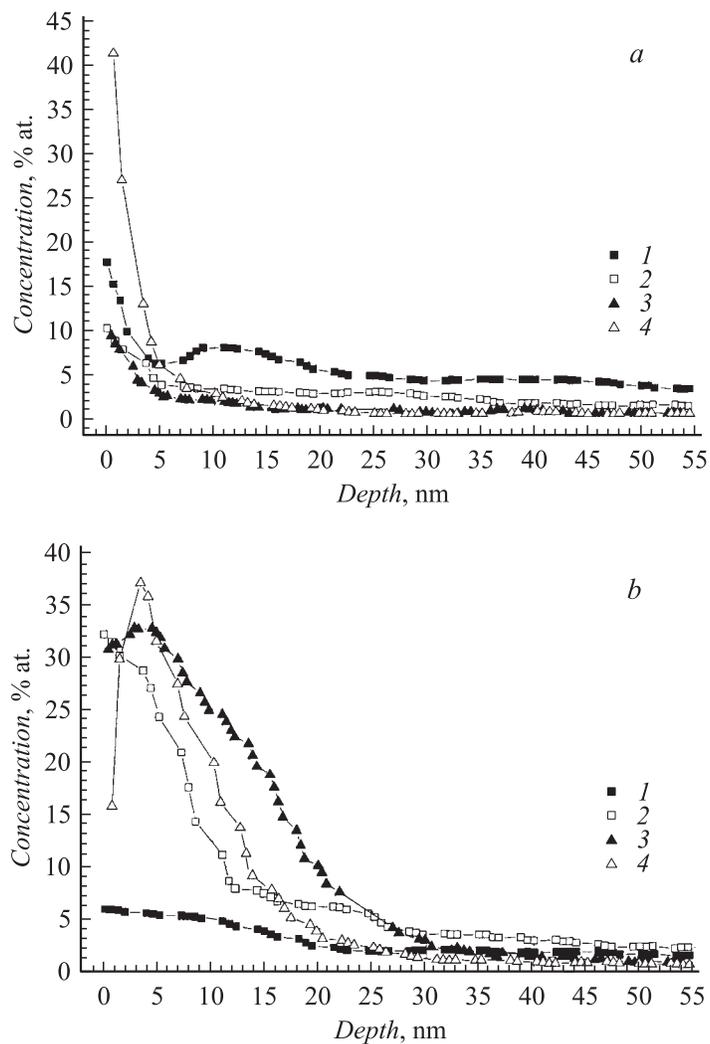


Рис. 2. Концентрация углерода *a* и кислорода *b* в приповерхностном слое медной фольги до (кривая 1) и после воздействия на нее ОРИПЭЛ в точке 1 (кривые 2,3) и в точке 2 (кривая 4). 1 — исходный образец, 2 — фольга являлась катодом, 3 и 4 — фольга являлась анодом.

концентрацию углерода в исходном образце. Увеличение концентрации углерода можно связать с неоднородностью распределения плотности тока разряда по площади анода. На диаметре темного полукольца, на котором помещена точка 2, область плотного разряда заканчивается. Это фиксировалось на фотографиях свечения разряда.

Отметим, что при положительной полярности импульсов напряжения генератора в разряде также генерируются убегающие электроны и рентгеновские кванты, что приводит при высоких давлениях различных газов к формированию объемного разряда в неоднородном электрическом поле без использования источника дополнительной предьонизации. Однако энергия убегающих электронов при этом не превышает 10–20 keV, что затрудняет их регистрацию. Рентгеновское излучение из газового диода нам удалось зарегистрировать только при использовании анода с малым радиусом кривизны из вольфрама и уменьшении межэлектродного зазора до ~ 0.5 mm. В подобных условиях рентгеновское излучение из промежутка ранее наблюдалось и в работе [4].

Условия формирования ОРИПЭЛ по длительности и амплитуде импульса напряжения и конструкции катода весьма широки [6,8–14]. Тогда как для генерации пучка убегающих электронов значительной амплитуды необходимо проводить оптимизацию многих параметров [9]. В данной работе не ставилась задача по исследованию модификации поверхности меди в условиях генерации пучка электронов с максимальной амплитудой. Для этого надо оптимизировать амплитуду импульса напряжения и длительность его переднего фронта, а также материал катода, межэлектродный зазор, конструкцию газового диода и катода.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при обработке медной фольги ОРИПЭЛ наблюдается очистка и модификация поверхности образцов. На анод комплексное воздействие оказывает плазма плотного наносекундного разряда с удельной мощностью энерговыклада в сотни мегаватт на кубический сантиметр и излучение различных спектральных диапазонов (в том числе УФ и ВУФ) из плазмы разряда. Зарегистрировано влияние сверхкороткого пучка убегающих электронов на модификацию поверхности медной фольги. Электронный пучок регистрировался за AlBe фольгой при отрицательной полярности импульса напряжения. ОРИПЭЛ легко реализуется в различных газах и при различных давлениях, причем при уменьшении давления газа плотность тока пучка в гелии может достигать 2 kA/cm^2 [15]. Это позволяет

прогнозировать возможность применения ОРИПЭЛ для модификации поверхности металлов в различных технологических процессах, а при определенной конструкции анода — и для модификации поверхности диэлектриков.

Авторы благодарят А.Б. Маркова за полезные обсуждения и И.А. Шулепова за тестирование образцов.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. Томск: Изд-во НТЛ, 2004. 326 с.
- [2] Буранов С.Н., Воеводин С.В., Воеводина И.А., Зубеев П.С., Карелин В.И., Ретин П.Б., Селемир В.Д., Усачева С.Ю. // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 03. С. 367–375.
- [3] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. В. 8. С. 1530–1533.
- [4] Станкевич Ю.Л., Калинин В.Г. // ДАН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 72–73.
- [5] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 3. С. 564–568.
- [6] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // Изв. вузов. Физика. 2004. № 12. С. 85–86.
- [7] Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 11. С. 19–26.
- [8] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007–1010.
- [9] Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. V. 23. N 4. P. 545–551.
- [10] Бакиит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 6. С. 576–580.
- [11] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [12] Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Петин В.К., Шляхтун С.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 12. С. 37–46.
- [13] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 7. С. 79–86.
- [14] Братчиков В.В., Гагаринов К.А., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 7. С. 34–42.
- [15] Бакиит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 69–75.