

УДК 535.37 + 778.663

ИЗМЕНЕНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГАЛОГЕНСЕРЕБРЯНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОМ СВЕТОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Бойченко А.П.*ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет»,
Краснодар, e-mail: bojchenco@yandex.ru*

На примере однотипных галогенсеребряных фотопленок отечественного производства «Микрат-200» и «Микрат-орто» при их экспонировании парными световыми импульсами в переменном электрическом поле исследовано изменение их светочувствительности. Установлено, что поле разных частотных диапазонов оказывает различное действие на фотографический процесс, проявляющееся не только на центрах чувствительности фотоэмульсионных микрокристаллов галогенидов серебра, но и вуали. С увеличением частоты от 1 до 10 kHz эффект изменения интегральной оптической плотности изображений возрастает. Для радиоимпульса длительностью $5 \cdot 10^{-4}$ с с несущей частотой 77 kHz показана независимость этого эффекта от синхронизации световых вспышек с положительными или отрицательными полупериодами напряжения.

Ключевые слова: галогенсеребряный фотоматериал, светочувствительность, «Эффект Ротштейна», переменное электрическое поле, двухимпульсное световое воздействие

CHANGE PHOTONSENSITIVITY HALOGEN SILVER PHOTOMATERIALS IN VARIABLE ELECTRICAL FIELD AT TWO-PULSE LIGHT INFLUENCE

Boychenko A.P.*Kuban State University, Krasnodar, e-mail: bojchenco@yandex.ru*

On an example same halogen silver of films of domestic manufacture «Mikrat-200» and «Mikrat-orto» at their exhibiting the pair light pulses in a variable electrical field investigate change of their photosensitivity. Is established, that the field of different frequency ranges renders various action on photographic process shown not only on the centres of sensitivity photoemulsion of microcrystals halogens silver, but also veil. With increase of frequency from 1 up to 10 kHz the effect of change of integrated optical density of the images grows. For a radiopulse the duration $5 \cdot 10^{-4}$ s with frequency 77 kHz shows independence of this effect of synchronization of light flares with positive or negative half-cycles of a voltage.

Keywords: halogen silver photomaterial, photosensitivity, «Effect Rothstein», variable electrical field, two-pulse light influence

Создание высокочувствительных и информативно-емких регистрирующих сред для фиксации быстропротекающих процессов является одной из актуальных задач многих областей физики и техники. Еще большую актуальность приобретает эта задача, когда требуется зарегистрировать сразу несколько полей и излучений различной природы. Ярким примером таких процессов являются протекающие в холодной неравновесной плазме барьерного газового разряда (БГР), возбуждаемого электрическим полем большой напряженности и сопровождающегося одновременным излучением электромагнитных и акустических колебаний в очень широком диапазоне спектра. При этом максимальная интенсивность его светового излучения и время горения составляют $\leq 10^{-6}$ J/m² и $\leq 10^{-6}$ s [1]. Практика показала, что для фиксации газоразрядных процессов наиболее удовлетворяют вышеперечисленным требованиям фотослой на микрокристаллах (МК) галогенидов серебра (AgHal) [2, 3].

Последними исследованиями (например, в [4]) установлено, что физический процесс взаимодействия БГР с AgHal-фотоматериалами сводится к реализации

«Эффекта Ротштейна», но в условиях воздействия двух и более импульсов светового излучения фиолетовой и ультрафиолетовой части электромагнитного спектра в присутствии электрического поля, преимущественно создаваемого одиночными видеоимпульсами высоковольтного напряжения. Результаты этих исследований нашли практическое применение в дефектоскопии мостовых металлоконструкций [5] и технико-криминалистическом исследовании бумажных документов [6], а также в научном исследовании внутренней структуры искровых каналов [7]. В названных работах наилучшие результаты достигнуты при возбуждении разряда переменным напряжением килогерцового диапазона и использовании AgHal-фотоматериалов светочувствительностью (СЧС) не более 5 ед. ГОСТ. Однако из большого количества работ, посвященных «Эффекту Ротштейна», имеется лишь одна [8], где при одиночной световой вспышке исследовалось действие на фототехническую пленку ФТ-СК переменного электрического поля с амплитудным значением $E = 5 \cdot 10^6$ V/m и частотой f от 20 до 200 kHz, а также 7 MHz. Поэтому в настоящей работе ставилась цель исследовать

довать «Эффект Ротштейна» в условиях его практической реализации упомянутых работ [5–7] при двухимпульсном световом воздействии на низкочувствительные фотопленки в переменном электрическом поле менее 20 кГц и переменном импульсном более указанной величины f с амплитудным значением E в фотослое $\sim 10^7$ В/м.

Материалы и методы исследования

Источником экспонирующего света, моделирующим излучение БГР, выбирался светодиод, имеющий в спектре максимум с длиной волны $\sim 4 \cdot 10^{-7}$ м. Он питался от генератора импульсов Г5-63 (прибор позволяет получать на выходе как одиночные, так и парные импульсы напряжения от 0 до 100 В с регулируемой длительностью и временным сдвигом от 10^{-7} с). Длительность световых вспышек составляла $5 \cdot 10^{-5}$ с, а их период следования – $7 \cdot 10^{-5}$ с. Вы-

бранный диапазон соответствует не только суммарному времени горения БГР за несколько периодов изменения переменного напряжения в килогерцовом диапазоне, но и соответствует времени релаксации электрического поля в МК AgHal [9]. Контроль временных характеристик световых импульсов осуществлялся с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-70. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Здесь: 1 – латунный электрод Роговского; 2 – медная сеточка (с шагом 0,5 мм) для пропускания излучения от светодиода 3 через кварцевый оптоволоконный провод 4; фотоэмульсионный слой пленки 5 и ее полимерная подложка 6; 7 – высоковольтный генератор (позволяет получать как непрерывное, так и импульсное переменное напряжение) с емкостным делителем напряжения 8 (описан в [10]), подключенного к запоминающему двухканальному осциллографу 9 (PCS-500 фирмы «Velleman»); 10 – генератор импульсов для питания светодиода 3.

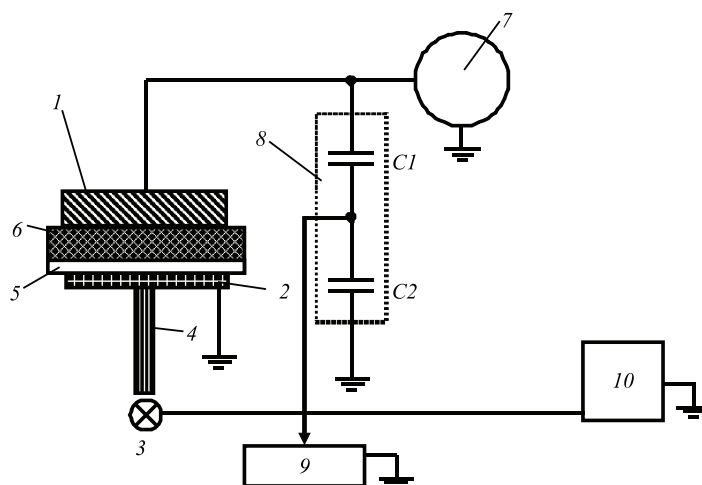


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования воздействия переменного электрического поля на фотографические материалы при их световом экспонировании (обозначения в тексте)

Для исследований выбирались низкочувствительные фотопленки «Микрат-200» и «Микрат-орто» (производство ОАО «Гасма», г. Казань). Причем первая фотопленка имела повышенную вуаль вследствие просроченного времени хранения в течение 25 лет, а вторая – является ее современным аналогом с улучшенными фотографическими и структурными характеристиками. При этом паспортные значения СЧС фотопленок и коэффициентов их контрастности одинаковы и составляют не менее трех единиц для обоих параметров. Каждая фотопленка экспонировалась световыми импульсами при частоте изменения поля в фотослое 1 и 10 кГц, а также при однократно прикладываемых радиоимпульсах напряжения длительностью $5 \cdot 10^{-4}$ с с несущей частотой 77 кГц и экспоненциально затухающей амплитудой. В последнем случае эксперимент проводился в двух вариантах. В первом, передний фронт излучения первого светового импульса синхронизировался с максимумом амплитуды положительного полупериода высоковольтного напряжения, а во втором варианте – с его отрицательным полупериодом. При этом передний фронт второго светового импульса совпадал с десятым полупериодом той же полярности максимума амплитуды напряжения,

что демонстрирует осциллограмма на рис. 2. Все описанные выше варианты экспериментов проводились в 10-кратной повторности и являлись опытными. Контрольным вариантом служили фотоматериалы, экспонированные с тем же количеством повторностей только световыми импульсами.

После химико-фотографической обработки фотопленок (они обрабатывались в проявителе СП-47 и нейтральном закрепителе [11] при температуре 23°C) полученные на них изображения денситометрировались. Эффект изменения η их интегральной оптической плотности D (и, соответственно, СЧС) при экспонировании фотопленок парными световыми импульсами в электрическом поле осуществлялся по ранее приведенной формуле в [10]: $\eta = \frac{D_1 - D_2}{D_2}$, где D_1 – интегральная оптическая плотность изображения на фотопленке, экспонированной парой световых импульсов в переменном электрическом поле; D_2 – интегральная оптическая плотность изображения на фотопленке, экспонированной только световыми импульсами. (Значения D_1 и D_2 получены при вычете оптической плотности вуали). Результаты экспериментов представлены в таблице.

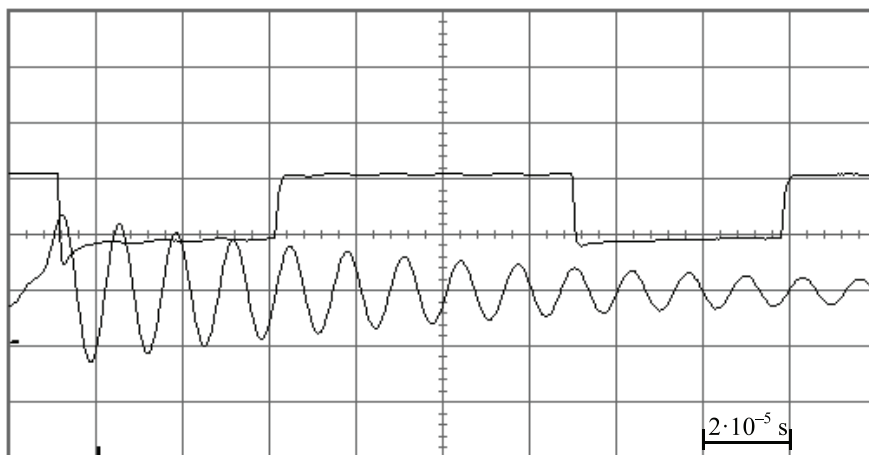


Рис. 2. Осциллограммы радиопульса напряжения (внизу) и световых импульсов (вверху), соответствующих фототоку ФЭУ.
Масштаб: одна клетка по оси ординат для напряжения – 3300 В; для фототока ФЭУ – $7,5 \cdot 10^{-6}$ А

Эффект изменения интегральной оптической плотности изображений на AgHal-фотоматериалах под действием переменного электрического поля в фотослое $E \sim 10^7$ В/м и двухимпульсном световом экспонировании

Фотоматериал	f , kHz	D_1		D_2	η	
«Микрат-200»	контроль	–		$0,025 \pm 0,002$	–	
	1,0	$0,013 \pm 0,002$		–	–0,5	
	10,0	$0,069 \pm 0,003$		–	1,8	
	77,0	+	–	–	+	–
$0,058 \pm 0,003$		$0,060 \pm 0,004$	1,4		1,4	
«Микрат-орто»	контроль	–		$0,080 \pm 0,002$	–	
	1,0	$0,032 \pm 0,002$		–	–0,6	
	10,0	$0,102 \pm 0,005$		–	0,3	
	77,0	+	–	–	+	–
$0,057 \pm 0,002$		$0,058 \pm 0,002$	–0,3		–0,3	

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как видно из таблицы, несмотря на идентичность фотографических характеристик исследованных фотопленок, величины интегральных оптических плотностей изображений D_2 на них после светового экспонирования различаются более чем в три раза, говоря об уменьшении СЧС у «Микрат-200» в результате истекшего срока хранения. Однако наложение электрического поля различных частот меняет ситуацию. Так, при $f = 1$ kHz для обеих фотопленок величины эффектов η существенно не различаются, но имеют отрицательный знак, указывающий на уменьшение СЧС фотоматериалов по сравнению с исходной. Причем электрополевое воздействие проявилось значительно больше (на 0,1 единицу η) для фотопленки «Микрат-орто». Полученный результат очень интересен тем, что в рамках «поляризационно-релаксационного механизма» [8] СЧС фотопленок вообще

не должна была меняться, т.к. действие внешнего поля с данной частотой по скорости нарастания и спада его напряженности минимум на порядок меньше скорости релаксации такового в объеме фотоэмульсионных МК. Следовательно, обнаруженные изменения η однозначно говорят о течении фотографических процессов, идущих на поверхности МК AgHal, по-видимому, сходных при реализации «электротопографического эффекта» [12], на котором основана «Электрополевая фотография».

В случае изменения поля с $f = 10$ kHz наблюдается смена знака η на положительный. Таким образом, при данной частоте исходная СЧС исследованных фотопленок увеличивается, что подтверждает ранее полученные результаты в [8] для пленки ФТ-СК. Однако это увеличение оказывается различным для однотипных фотопленок. У «Микрат-орто» оно составляет всего 0,3 единицы, а для «состарившейся» пленки «Микрат-200» – 1,8 единиц. Полученный результат является новым и говорит

о влиянии поля не только на центры СЧС в МК AgHal, но и на центры вуали, когда внешнее поле в кристаллике не скомпенсировано внутренним, что проявляется при $f \geq 10$ kHz и, вероятно, двухимпульсном световом экспонировании. Следует отметить, что обнаруженное увеличение СЧС у «состарившейся» фотопленки сходно с ранее обнаруженным нами на рентгеновской фотопленке «RETINA» после действия на нее 250 импульсов магнитного поля [13]. Однако основания для утверждений идентичности физических механизмов действия переменного электрического и магнитного полей на центры СЧС и вуали в МК AgHal пока отсутствуют.

Действие на однотипные фотопленки импульса переменного электрического поля частотой 77 kHz приводит к еще большему различию изменения их СЧС. Оно выражается не только в большой разнице величин эффекта η действия поля, но и отражается на его противоположных знаках. По сравнению с предыдущим вариантом экспонирования, для пленки «Микрат-200» эффект изменения оптической плотности изображений хотя и уменьшился в $\sim 1,3$ раза, но сохранил положительный знак, тогда как для «Микрат-орто» произошла смена знака η на отрицательный и уменьшение его абсолютной величины на 0.6 единиц. Важно отметить, что синхронизация световых вспышек с положительным или отрицательным полупериодом импульса переменного напряжения не выявила каких-либо различий в изменении СЧС обоих типов фотопленок в отличие от ранее полученных результатов действия однополярных видеоимпульсов длительностью $\sim 1,2 \cdot 10^{-5}$ s [4]. Согласно [8] этот результат объясняется тем, что при постоянном времени экспонирования (в нашем случае суммарной длительности вспышек 10^{-4} s) и переменном напряжении действие последнего может рассматриваться как многократное импульсное поле переменной полярности, а сама экспозиция – в виде ее дробления на отдельные вспышки количеством ~ 15 единиц при $f = 77$ kHz. Таким образом, процессы формирования изображений в AgHal-фотоматериалах при каждой полярности напряжения будут интегрироваться. Очевидно, такая интеграция должна происходить вплоть до длительности вспышек, сопоставимой с длительностью полупериодов переменного напряжения и синхронизации вспышек с его разными полярностями, а при синхронизации с однополярными полупериодами – результат экспонирования AgHal-фотоматериалов должен быть идентичным их экспонированию в импульсном электрическом поле одного

направления силовых линий, что требует отдельной экспериментальной проверки (ее результатам планируется посветить отдельную публикацию).

Заключение

Научно важным и практически ценным результатом проведенных исследований является обнаружение сенсibiliзирующих свойств переменного электрического поля с $f \geq 10$ kHz на «состарившейся» фотопленке «Микрат-200». Таким образом, наряду с химическими методами подавления вуали и повышения СЧС AgHal-фотоматериалов можно говорить о физических, что открывает путь дальнейших исследований в этом направлении. Кроме того, из полученных результатов следует, что «Эффект Ротштейна» также реализуется в переменном и переменном импульсном электрическом поле $E \sim 10^7$ V/m различных частот, но при экспонировании AgHal-фотоматериалов парными световыми импульсами имеет ряд характерных особенностей. Это изменение (в исследованном случае уменьшение) СЧС низкочувствительных фотопленок при $f = 1$ kHz, когда скорость нарастания и спада напряженности внешнего поля оказывается меньше скорости его релаксации в объеме фотоэмульсионных МК; значительное повышение СЧС фотопленки с истекшим сроком хранения у «Микрат-200» по сравнению с не истекшим у «Микрат-орто» при $f = 10$ kHz; отсутствие каких-либо различий в действии на эти фотопленки импульсов переменного электрического поля $f = 77$ kHz и световых при синхронизации последних с той или иной полярностью полупериода напряжения, но с существенно различающимися величинами и знаками эффекта η .

Обнаруженные закономерности при моделировании фотографического действия БГР в переменном электрическом поле позволяют расширить его практическое использование, а также указывают на возможность изготовления специальных AgHal-фотоматериалов с управляемой СЧС по заданной программе. Вместе с тем отметим, что установленные закономерности очевидно справедливы только для двухимпульсного режима экспонирования AgHal-фотоматериалов низкой чувствительности и могут отличаться от него как для других фотоматериалов, так и при более двух импульсах светового воздействия.

Список литературы

1. Бойченко А.П., Яковенко Н.А. Методика получения интегрального спектра излучения слабого лавинного разряда с диэлектриком на электроде // Автометрия. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 113–118.

2. Tomoda Y., Watanabe S. Image formation by high-voltage electric discharge // *J. Soc. Photogr. Sci.* – 1984. – Vol. 47, № 2. – P. 101–107.
3. Бабиков М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С. Техника высоких напряжений. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 670 с.
4. Бойченко А.П., Хонякин С.В. Исследование влияния составляющих излучения барьерного разряда на формирование газоразрядных изображений // *Научные итоги 2011 года: достижения, проекты, гипотезы: матер. I Междунар. научно-практич. конфер. Ч. 2.* (Новосибирск, 26 дек. 2011 г.) – Новосибирск, 2011. – С. 39–43.
5. Бойченко А.П., Староверов А.И. Газоразрядная неразрушающая диагностика микротрещин и коррозии в мостовых металлоконструкциях // *Известия Томского политехнического университета.* – 2003. – Т. 306, № 5. – С. 83–84.
6. Бойченко А.П., Гаврилин Д.А. Газоразрядная диагностика текстов на бумажных носителях // *Письма в ЖТФ.* – 2012. – Т. 38. – Вып. 20. – С. 57–62.
7. Дежкунова С.В., Зацепин Н.Н., Сырец О.Ф. Структура искровых каналов при разряде в узких промежутках // *Вестник АН БССР.* – 1988. – № 3. – С. 87–89.
8. Колубин А.А., Лемешко Б.Д. О возможности управления чувствительностью фотографической эмульсии посредством высокочастотного электрического поля // *Журн. науч. и прикладной фото- и кинематографии.* – 1972. – Т. 17, № 2. – С. 54–55.
9. Мейкляр П.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. М.: Наука, 1972. – 400 с.
10. Бойченко А.П. Воздействие барьерного разряда лавинной формы на галогенсеребряный фотоматериал при заблокированной ионной проводимости // *ФТП.* – 2012. – Т. 46, № 4. – С. 525–529.
11. Микулин В.П. Фотографический рецептурный справочник. – М.: Искусство, 1969. – 319 с.
12. О природе электрочувствительности фотографических эмульсионных слоев / А.Е. Кравцов, В.И. Пипа, М.А. Резников, М.В. Фок // *Журн. науч. и прикладной фото- и кинематографии.* – 1977. – Т. 22, № 3. – С. 186–195.
13. Фролов Д.Р., Бойченко А.П. Воздействие импульсного магнитного поля на галогенсеребряный фотографический процесс // *ЖТФ.* – 2012. – Т. 82, № 4. – С. 150–152.
3. Babikov M.A., Komarov N.S., Sergeev A.S. *Tehnika vysokih naprjazhenij.* M., L.: Gosjenergoizdat, 1963. 670 p.
4. Bojchenko A.P., Honjakin S.V. *Issledovanie vlijanija sostavljajuwih izlucheniya bar'ernogo razrjada na formirovanie gazorazrjadnyh izobrazhenij* // *Nauchnye itogi 2011 goda: dostizhenija, proekty, gipotezy: Mater. I Mezhdunar. nauchno-praktich. konfer. Ch. 2.* (Novosibirsk, 26 dek. 2011 g.) Novosibirsk, 2011. pp. 39–43.
5. Bojchenko A.P., Staroverov A.I. *Gazorazrjadnaja nerazrushajuwaja diagnostika mikrotrewin i korrozii v mostovyh metallokonstrukcijah* // *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta.* 2003. T. 306, no. 5. pp. 83–84.
6. Bojchenko A.P., Gavrilin D.A. *Gazorazrjadnaja diagnostika tekstov na bumazhnyh nositeljah* // *Pis'ma v ZhTF.* 2012. T. 38. Vyp. 20. pp. 57–62.
7. Dezhkunova S.V., Zacepin N.N., Syrec O.F. *Struktura iskrovyyh kanalov pri razrjade v uzkih promezhutkah* // *Vestnik AN BSSR.* 1988. no. 3. pp. 87–89.
8. Koljubin A.A., Lemeshko B.D. *O vozmozhnosti upravlenija chuvstvitel'nost'ju fotograficheskoy jemul'sii posredstvom vysokochastotnogo jelektricheskogo polja* // *Zhurn. nauch. i prikladnoj foto- i kinematografii.* 1972. T. 17, no. 2. pp. 54–55.
9. Mejkljar P.V. *Fizicheskie processy pri obrazovanii skrytogo fotograficheskogo izobrazhenija.* M.: Nauka, 1972. 400 p.
10. Bojchenko A.P. *Vozdejstvie bar'ernogo razrjada lavinnoj formy na galogenserebrjanyj fotomaterial pri zablockirovannoj ionnoj provodimosti* // *FTP.* 2012. T. 46, no. 4. pp. 525–529.
11. Mikulin V.P. *Fotograficheskij recepturnyj spravochnik.* M.: Iskusstvo, 1969. 319 p.
12. Kravcov A.E., Pipa V.I., Reznikov M.A., Fok M.V. *O prirode jelektrouchstvitel'nosti fotograficheskikh jemul'sionnyh sloev* // *Zhurn. nauch. i prikladnoj foto- i kinematografii.* 1977. T. 22, no. 3. pp. 186–195.
13. Frolov D.R., Bojchenko A.P. *Vozdejstvie impul'snogo magnitnogo polja na galogenserebrjanyj fotograficheskij process* // *ZhTF.* 2012. T. 82, no. 4. pp. 150–152.

References

1. Bojchenko A.P., Jakovenko N.A. *Metodika poluchenija integral'nogo spektra izlucheniya slabotochnogo lavinnogo razrjada s dijelektrikom na jelektrode* // *Avtometrija.* 2002. T. 38, no. 5. pp. 113–118.
2. Tomoda Y., Watanabe S. *Image formation by high-voltage electric discharge* // *J. Soc. Photogr. Sci.* 1984. Vol. 47, no. 2. pp. 101–107.

Рецензенты:

Богатов Н.М., д.ф.-м.н., профессор, зав кафедрой физики и информационных систем Кубанского государственного университета, г. Краснодар;

Копытов Г.Ф., д.ф.-м.н., профессор, зав кафедрой радиофизики и нанотехнологий Кубанского государственного университета, г. Краснодар.

Работа поступила в редакцию 06.09.2012.