

УДК 535.37 + 778.663

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА С ГАЛОГЕНСЕРЕБРЯНЫМИ ФОТОМАТЕРИАЛАМИ

Бойченко А.П.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет Минобрнауки России»,
Краснодар, e-mail: bojchenco@yandex.ru

На примере рентгеновских фотопленок «RETINA» и «PRIMAX», служащих диэлектрическими барьерами на одном из электродов Роговского, исследованы в воздухе атмосферного давления характеристики зажигания барьерного разряда, возбуждаемого одиночными колоколообразными импульсами напряжения положительной и отрицательной полярности с длительностью ~ 13 мкс. Установлен многоимпульсный режим горения разряда в промежутке толщиной 50 мкм и показано, что первый разрядный импульс всегда возникает при строго определенном напряжении, тогда как следующие за ним импульсы стохастически появляются в разные моменты времени изменения высоковольтного импульса. При этом длительность световых импульсов разряда может на порядок превышать таковую его электрических импульсов. Вследствие чего показано многократное световое экспонирование галогенсеребряных фотоматериалов в присутствии одиночного импульса электрического поля. На основе этих результатов смоделировано воздействие разряда на фотоматериалы и выявлена реализация в них «Эффекта Ротштейна», подчиняющегося новым закономерностям, отличным от ранее установленных для одноимпульсного режима экспонирования в полях менее $\sim 10^7$ В/м.

Ключевые слова: барьерный газовый разряд, галогенсеребряный фотоматериал, «Эффект Ротштейна»

BASIC LAWS INTERACTIONS BARRIER DISCHARGE WITH HALOGEN SILVER PHOTOMATERIALS

Boychenko A.P.

Kuban State University, Krasnodar, e-mail: bojchenco@yandex.ru

On an example of X-ray films «RETINA» and «PRIMAX», employees electrical isolators by barriers on one of electrodes Rogovskiy, are investigated in air of atmospheric pressure of the characteristic of ignition of the barrier gas-discharge raised single bell-figurative by pulses voltage of positive and negative polarity with duration $\sim 1,3 \cdot 10^{-5}$ s. The multipulse mode of burning of the gas-discharge in an interval by thickness 50 microns is established and is shown, that the first digit pulse always arises at the strictly certain voltage, whereas the pulses, following it, arbitrary occur at the different moments of time of change of a high-voltage pulse. Thus the duration of light pulses of the gas-discharge can on the order exceed of those its electrical pulses. Owing to what the repeated light exhibiting halogen silver of photomaterials is shown at the presence of a single pulse of an electrical field. On the basis of these results the influence of the gas-discharge on photomaterials is simulated and the realization in them «Effect Rothstein», submitting to the new laws which are distinct from before established for one-pulse mode exhibiting, ined a for an one-pulse mode, $\sim 10^7$ V/m is revealed.

Keywords: barrier gas-discharge, halogen silver photomaterial, «Effect Rothstein»

Барьерный газовый разряд (БГР), возникающий в системе конденсатора с диэлектрическими или полупроводниковыми барьерами, находит в настоящее время самое разнообразное применение, начиная от озонаторов и заканчивая преобразователями и визуализаторами инфракрасного излучения. Наряду с диэлектрическими и полупроводниковыми барьерами используются их фоточувствительные композиции, особенно в тех случаях, когда стоит задача документальной фиксации быстропротекающих ($\ll 10^{-3}$ с) процессов. Одним из примеров таких композиций являются фотографические материалы на основе микрокристаллов (МК) галогенидов серебра (AgHal), полупроводниковые и электронно-оптические свойства которых уже более 150 лет используются как в любительской фотографии, так и в различных областях науки и техники. Возможность непосредственного размещения AgHal-фотоматериалов в магнитных и электрических полях большой напряженности, высокоинтенсивного ионизирующего

излучения и пр. делает их незаменимыми средствами регистрации информации и визуализации изображений в таких условиях.

Благодаря названной возможности к использованию AgHal-фотоматериалов часто прибегают при изучении различных газоразрядных явлений и процессов, развивающихся в диэлектрической изоляции высоковольтных установок [1], а также при оценке величин пробойного напряжения [2], что позволяет, в частности, дифференцированно визуализировать характерные особенности зажигания БГР, возбуждаемого различными формами высоковольтного напряжения и его полярности (относительно электрода, на котором расположен фотоматериал). Несмотря на использование фотоматериалов для регистрации БГР, научному исследованию процессов в их фоточувствительной компоненте – эмульсионных МК AgHal под действием разряда – посвящено очень малое количество работ. Лишь за последние 10 лет были выявлены некоторые стороны газоразрядно-фотографических

процессов, в частности, относящиеся к их электронным [3] или ионным стадиям [4]. В отличие от электрополевого или, например, электромагнитного воздействия, низкотемпературная плазма БГР представляет собой многофакторно воздействующую систему, т.к. при горении разряда не только регистрируется широкодиапазонный спектр различных классов излучений (электромагнитного и акустического), но и ряд физико-химических процессов, протекающих между компонентами плазменной среды. Из чего понятно, что в процессе взаимодействия БГР с фотоматериалами их МК AgHal будут одновременно подвергаться всем перечисленным факторам воздействия. Поэтому в [5] нами был проведен расчет вклада каждой компоненты БГР в такое воздействие и показано, что почти 90% его доли приходится на электромагнитное излучение ультрафиолетового и фиолетового диапазонов спектра, тогда как, например, на долю акустического от 40 Гц до 10 кГц – всего 3%. Указанный диапазон электромагнитного воздействия лежит в области собственного поглощения МК AgHal [6], что объясняет возможность получения газоразрядных изображений на любых AgHal-фотоматериалах как низкой, так и высокой светочувствительности (СЧС). Особенность взаимодействия с ними БГР заключена еще и в том, что, с одной стороны, зажигание разряда и режим его горения зависят от эмиссионных и электро-геометрических характеристик фотоматериала (соотношения толщин и диэлектрических проницаемостей его подложки и фотослоя), величины газоразрядного промежутка и химической природы газа [3], а с другой – наложение внешнего электрического поля на газоразрядно-фотографическую систему конденсатора приводит к изменению электрического состояния МК AgHal, межфазной поляризации на границе с окружающей их желатиной и одновременному экспонированию световыми импульсами от БГР, т.к. горение последнего в газе атмосферного давления носит импульсный характер независимо от формы прикладываемого напряжения [7]. Причем количество световых вспышек от разряда даже за одиночный импульс электрического поля может достигать нескольких единиц [7] и в зависимости от моментов синхронизации импульсов света с электрополевым способом приводить к разным фотографическим эффектам [8]. Именно в таких условиях взаимодействие БГР с AgHal-фотоматериалами совершенно не исследовалось. Поэтому для установления его основных закономерностей ставилось две серии экспериментов. В первой

изучалась кинетика свечения БГР лавинной формы, возбуждаемого в промежутке толщиной 50 мкм с фотоматериалом, расположенном на одном электроде, а разряд возбуждался одиночными колоколообразными видеопульсами разной полярности. Во второй серии экспериментов моделировались условия горения БГР на основе выявленных закономерностей в первой серии, и оценивалась реакция фоточувствительного слоя материалов на такое воздействие путем денситометрии сформированных на них изображений.

Материалы и методы исследования

Исследования кинетики свечения лавинного БГР проводились на ранее описанной установке [4]. Единственным ее отличием являлось использование фотоэлектронного умножителя ФЭУ-70. Этот прибор обладает хорошими импульсными характеристиками с временным разрешением до 15 нс, а также весьма низким порогом спектральной чувствительности ($\sim 5 \cdot 10^{-16}$ Вт/Гц^{-0.5}). Причем максимум этой чувствительности лежит в области 340–440 нм, на который приходится максимум спектра излучения БГР [3]. Разряд возбуждался одиночными колоколообразными видеопульсами как положительной, так и отрицательной полярности (относительно электрода, на котором лежит фотоматериал) и длительностью ~ 13 мкс (на уровне 0,1). Его горение происходило в воздухе атмосферного давления и температуре 25°C, постоянство химического состава и концентрация водяных паров которого контролировались на газовом хроматографе «Кристалл-5000». С помощью виртуального запоминающего осциллографа PCS-500 (фирма «Velleman») регистрировались напряжение зажигания БГР и соответствующие ему импульсы фототока ФЭУ. Во всех сериях эксперимента использовались рентгеновские фотопленки «RETINA» и «PRIMAX», как проявляющие наибольшую газоразрядную чувствительность [3]. На рис. 1, а–з представлены осциллограммы горения БГР при амплитудном значении напряжения 8250 ± 412 В (нижняя осциллограмма) и его светового излучения (верхняя осциллограмма), полученные с интервалом в 15 с. Как из них видно, при одиночном импульсе электрического поля возникает несколько отдельных импульсов разряда (по времени зажигания и форме им идентичны импульсы тока БГР), которым соответствуют отдельные световые вспышки, но значительно большей длительности. В случае периода следования разрядных импульсов, соизмеримых с их длительностью и менее, импульсы светового излучения суммируются, а их длительность и амплитуда при этом увеличиваются (см., например, рис. 1, з), удлинняя время горения БГР.

Учитывая описанную закономерность, во второй серии экспериментов по моделированию воздействия разряда на AgHal-фотопленки выбиралась пара световых импульсов с фиксированной длительностью 1,5 мкс, а экспонирование ими фотопленок осуществлялось при напряженности электрического поля в фотослое $E: 6 \cdot 10^6$ В/м (при которой обычно зажигается БГР с данными фотопленками в газоразрядном промежутке толщиной 50 мкм) и $1,5 \cdot 10^7$ В/м, когда разряд стабильно горит в той же системе конденсатора. При каждой напряженности поля экспери-

мент проводился в двух вариантах. В первом период следования световых импульсов T фиксировался на величине их длительности – 1,5 мкс, и их пачкой сканировалось три участка импульса поля:

а) на уровне $0,4E_1$ переднего фронта;

б) в максимуме напряженности E_{\max} ;

в) на уровне $0,5E_2$ заднего фронта электрополевого импульса.

Во втором варианте эксперимента передний фронт первого светового импульса фиксировался на уровне $0,4E_1$ переднего фронта импульса электрического поля, а максимум излучения второго светового импульса синхронизировался с максимумом поля E_{\max} и затем на уровне $0,5E_2$ его заднего фронта. В этом случае T световых импульсов соответствовал 3,3 и 7,2 мкс.

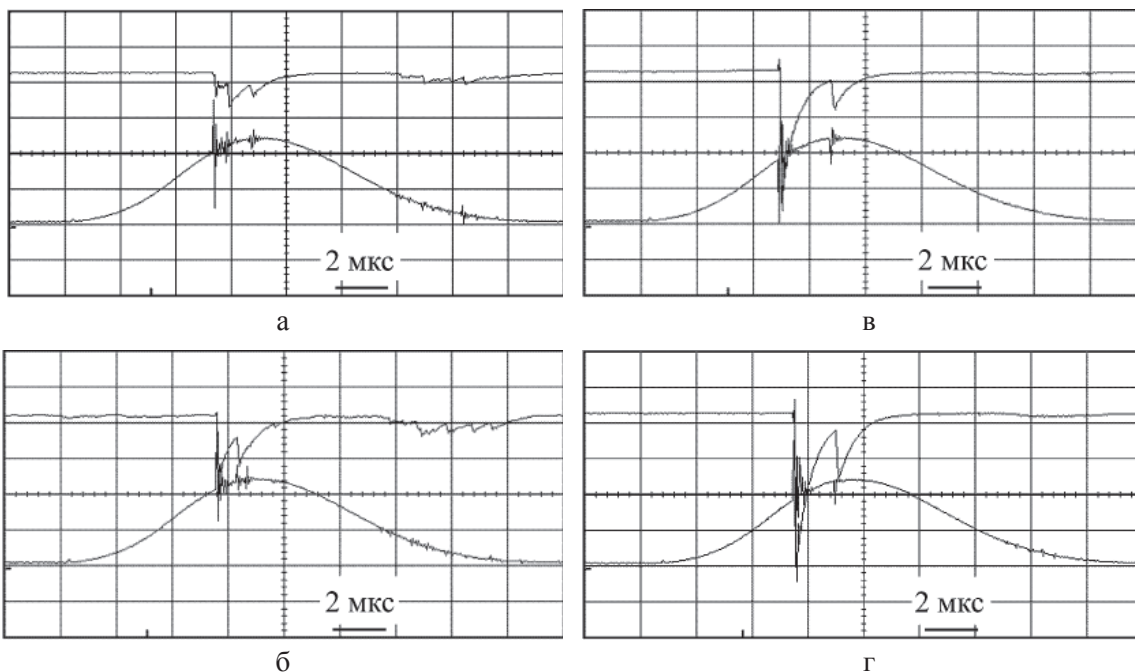


Рис. 1. Серия осциллограмм напряжений пробоя воздуха атмосферного давления в системе конденсатора с $AgHal$ -фотоматериалом на одном из электродов Роговского и соответствующие БГР осциллограммы фототока ФЭУ. Масштаб: одна клетка по оси ординат для напряжения БГР – 3300 В; для фототока ФЭУ – $2,5 \cdot 10^{-6}$ А (описание в тексте)

Источником экспонирующего света, моделирующим излучение БГР, выбирался светодиод, имеющий в спектре максимум с длиной волны ~ 400 нм. Излучение светодиода пропусклось через светофильтр из стекла марки ФС-6. Светодиод питался от генератора импульсов Г5-63 (он 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), синхронизированного с двумя другими такими же генераторами, один из которых служил запускающим высоковольтный импульсный генератор, а второй – линией задержки. Контрольным вариантом эксперимента являлись фотоматериалы, экспонированные только световыми импульсами с указанными значениями T . Все описанные варианты экспонирования фотопленок проводились в десятикратной повторности. Техническая организация эксперимента осуществлялась на установке, схема которой приведена на рис. 2.

Здесь 1 – латунный электрод Роговского; 2 – медная сеточка (с шагом 0,5 мм) для пропускания излучения от светодиода 3 через кварцевый оптоволоконный провод 4 и светофильтр 5; фотоэмульсионный слой пленки 6 и ее полимерная подложка 7; 8 – высоковольтный импульсный генератор с емкостным делителем напряжения 9 (описан в [13]), подключенный к упомянутому выше запоминающему двухка-

нальному осциллографу 10 (PCS-500), с помощью которого определялась синхронизация электрополевого и световых импульсов; 11 – запускающий генератор импульсов с генератором 12, служащим линией задержки; 13 – генератор импульсов для питания светодиода 3.

После химико-фотографической обработки фотопленок (они обрабатывались в проявителе СП-47 и нейтральном закрепителе при температуре 23°C) полученные на них изображения денситометрировались. Оценка эффекта изменения η их интегральной оптической плотности D (и, соответственно, СЧС) при экспонировании фотопленок парными световыми импульсами в электрическом поле осуществлялась по ранее приведенной формуле в [4]:

$$\eta = \frac{D_1 - D_2}{D_2}$$

где D_1 – интегральная оптическая плотность изображения на фотопленке, экспонированной парой световых импульсов в 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 эксперимента представлены в табл. 1 и 2, в которых значения D_2 соответствуют условию $E = 0$, а D_1 – всем остальным вариантам воздействия электрического поля.

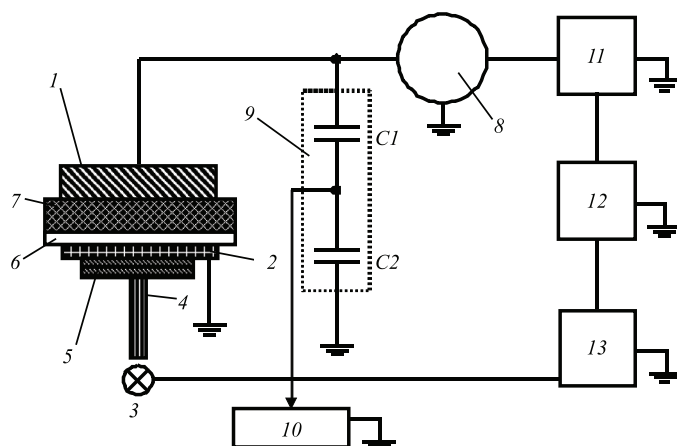


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для моделирования воздействия БГР на фотографические материалы (обозначения в тексте)

Результаты исследования и их обсуждение

Как видно из серии осциллограмм импульсного пробоя воздуха (рис. 1, а–г), первый разрядный импульс всегда происходит при одном и том же напряжении (одной и той же напряженности поля E [9]), тогда как следующие за ним импульсы БГР стохастически возникают в различные моменты времени. При этом стохастический режим имеют как количество разрядных импульсов и период их следования, так и амплитуда. Подробный анализ осциллограмм показал, что вспышка светового излучения возникает с запаздыванием относительно переднего фронта разрядного импульса на величину половины его длительности. Это соответствует появлению импульса света на максимуме импульса тока БГР. Как отмечалось выше, при этом длительность импульсов светового излучения оказывается на порядок больше длительности разрядных. Обнаруженная закономерность согласуется с результатами ранее проведенных исследо-

ваний импульсного пробоя воздуха атмосферного давления в узких разрядных промежутках микронной толщины [10], где также обнаружено увеличение длительности свечения разряда при размещении на электродах барьеров из слюды. Однако новым результатом настоящих исследований является обнаружение одной из причин увеличения длительности и амплитуды световых импульсов БГР: при импульсном пробое воздуха атмосферного давления они происходят за счет слияния вспышек друг с другом, когда период следования возникающих разрядных импульсов соизмерим или менее их длительности. Есть основания полагать, что обнаруженная закономерность связана с электрической и геометрической неоднородностью диэлектрических барьеров, а также их эмиссионными характеристиками. В наших экспериментах это AgHal-фотоматериалы, представляющие собой многослойные композиции из диэлектрических полимеров и дисперсных полупроводников микронного масштаба – МК AgHal [6].

Таблица 1

Эффект влияния парных световых импульсов с фиксированным периодом следования $T = 1,5$ мкс на интегральную оптическую плотность изображений у рентгеновских фотопленок «RETINA» и «PRIMAX» в импульсном электрическом поле

Вариант			«RETINA»						
			$E = 0$	$0,4E_1$	η	E_{max}	η	$0,5E_2$	η
$E \sim 6 \cdot 10^6$, В/м	Полярность	+	$0,124 \pm 0,006$	$0,198 \pm 0,009$	0,6	$0,152 \pm 0,008$	0,2	$0,194 \pm 0,010$	0,5
		–		$0,240 \pm 0,012$	0,9	$0,150 \pm 0,008$	0,2	$0,245 \pm 0,013$	0,9
+		$0,127 \pm 0,007$		0	$0,085 \pm 0,003$	–0,3	$0,117 \pm 0,006$	0	
–		$0,133 \pm 0,007$		0	$0,094 \pm 0,004$	–0,2	$0,127 \pm 0,007$	0	
Вариант			«PRIMAX»						
$E \sim 6 \cdot 10^6$, В/м	Полярность	+	$0,033 \pm 0,002$	$0,036 \pm 0,002$	0	$0,008 \pm 0,001$	–0,7	$0,029 \pm 0,004$	0
		–		$0,042 \pm 0,002$	0,3	$0,016 \pm 0,001$	–0,5	$0,029 \pm 0,003$	0
+		$0,063 \pm 0,005$		0,9	$0,051 \pm 0,003$	0,5	$0,070 \pm 0,006$	1,1	
–		$0,053 \pm 0,005$		0,6	$0,041 \pm 0,003$	0,2	$0,065 \pm 0,007$	0,9	

Таблица 2

Эффект влияния парных световых импульсов с изменяющимся периодом следования на интегральную оптическую плотность изображений у рентгеновских фотопленок «RETINA» и «PRIMAX» в импульсном электрическом поле

Полярность	$E, \text{В/м}$	«RETINA»				«PRIMAX»			
		$T = 3,3 \text{ мкс}$	η	$T = 7,2 \text{ мкс}$	η	$T = 3,3 \text{ мкс}$	η	$T = 7,2 \text{ мкс}$	η
	0	$0,123 \pm 0,006$	–	$0,129 \pm 0,005$	–	$0,033 \pm 0,002$	–	$0,034 \pm 0,003$	–
+	$6 \cdot 10^6$	$0,254 \pm 0,013$	1,0	$0,146 \pm 0,006$	0,1	$0,012 \pm 0,001$	–0,6	$0,019 \pm 0,002$	–0,4
–		$0,195 \pm 0,010$	0,6	$0,133 \pm 0,006$	0	$0,020 \pm 0,002$	–0,4	$0,018 \pm 0,002$	–0,4
+	$1,5 \cdot 10^7$	$0,177 \pm 0,008$	0,4	$0,144 \pm 0,007$	0,1	$0,040 \pm 0,003$	0,2	$0,060 \pm 0,005$	0,8
–		$0,215 \pm 0,010$	0,7	$0,148 \pm 0,007$	0,1	$0,060 \pm 0,005$	0,8	$0,059 \pm 0,004$	0,8

Как и ожидалось, при описанных условиях моделирования воздействия лавинного БГР на AgHal-фотопленки реакция их фоточувствительной компоненты при различных моментах синхронизации световых импульсов с импульсом поля, оказывается не только неодинаковой, но и в большинстве полученных результатов имеет прямо противоположные эффекты η . Особенно отчетливо она видна при сравнении изображений, полученных только световыми импульсами с разными периодами следования и в присутствии электрического поля. Важно отметить, что без электрополевого воздействия (условие $E = 0$) в исследованном диапазоне значений T этих вспышек интегральная оптическая плотность изображений не меняется (см. табл. 1 и 2). Согласно [11] этот результат говорит о том, что в указанном диапазоне периода следования импульсов света его фотографическое действие находится за «критической частотой», т.е. не зависит от T . Наложение электрического поля на экспонируемый светом AgHal-фотоматериал лишает его этой независимости. Причем по-разному для разных фотоматериалов и условий их экспонирования, что требует отдельного рассмотрения.

Синхронизация импульса электрического поля с фиксированным периодом следования световых вспышек. Этот случай интересен тем, что при синхронизации парных световых импульсов с передним или задним фронтами электрического интегральная оптическая плотность изображений либо не изменяется (нулевые значения η), либо достоверно увеличивается на всех исследованных фотопленках. Причем на фотопленке «RETINA» наибольший эффект η достигается в поле напряженностью $E \sim 6 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ на импульсах отрицательной полярности, а на «PRIMAX» – в $E \sim 1,5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ на импульсах положительной полярности. Когда же световые импульсы оказываются в максимуме напряженности импульса электрического поля E_{max} , то величины эффектов η либо уменьшаются по сравнению с полученными в вышеописан-

ных условиях, либо меняют знак на противоположный, указывая на уменьшение СЧС фотоматериалов по сравнению с ее исходным значением. Таким образом, действие поля при данных условиях синхронизации со светом оказывает десенсибилизирующее действие на обе разновидности фотопленок. Наибольшая десенсибилизация достигается при импульсах положительной полярности с $E \sim 1,5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ на пленке «RETINA», а на «PRIMAX» – при той же полярности, но в поле с $E \sim 6 \cdot 10^6 \text{ В/м}$. Кроме того, полученные в данном варианте эксперимента результаты также указывают на возможность существенного влияния полярности импульса высоковольтного напряжения, когда при создаваемой им напряженности электрического поля достигаются высокие значения параметра η .

Синхронизация импульса электрического поля с изменяющимся периодом следования световых вспышек. Данный вариант экспонирования AgHal-фотопленок приводит к эффектам η , существенно отличающимся от описанных для предыдущего варианта эксперимента, особенно у пленки «RETINA». Так, в электрополевым импульсе положительной полярности и напряженностью $6 \cdot 10^6 \text{ В/м}$, максимум которого синхронизирован со вторым световым импульсом, показывает существенное увеличение СЧС фотопленки с ее последующим падением почти до исходного уровня ($\eta = 0,1$) при совмещении светового импульса с задним фронтом электрополевого. Противоположный эффект η на той же фотопленке наблюдается при импульсе отрицательной полярности. Здесь СЧС уменьшается до исходного уровня при тех же условиях синхронизации второго светового импульса. В поле напряженностью $1,5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ и тех же условиях синхронизации со второй вспышкой эффект изменения η говорит о подъеме СЧС (особенно при электрическом импульсе отрицательной полярности) фотопленки «RETINA» и ее падении при синхронизации заднего фронта электрополевого импульса со световым. Как видно из

табл. 1 и 2, этот результат противоположен «эффектам поля», когда синхронизированными с ним оказываются два световых импульса, как в максимуме напряженности, так и в минимуме его заднего фронта.

На фотопленке «PRIMAX» только при электрическом импульсе положительной полярности и напряженности поля $1,5 \cdot 10^7$ В/м закономерность изменения эффекта η схожа с описанным для этой пленки в п. 3.1. Во всех остальных вариантах при импульсах отрицательной полярности увеличенная по сравнению с исходной СЧС этой фотопленки остается на неизменном уровне как при синхронизации второго светового импульса с максимумом E_{\max} , так и с минимумом на его заднем фронте $0,5E_2$. Однако при величине поля $6 \cdot 10^6$ В/м эффект η имеет отрицательный знак, а при $E \sim 1,5 \cdot 10^7$ В/м – положительный. Наконец, при электрополевых импульсах положительной полярности и их $E \sim 6 \cdot 10^6$ В/м «отрицательный эффект» действия поля оказывается максимальным при синхронизации второго светового импульса с вершиной электрического, т.е. с максимумом его E_{\max} .

Анализ полученных результатов однозначно показывает проявление «Эффекта Ротштейна», но подчиняющегося совершенно новым закономерностям, которые выявляются при наличии второго светового импульса. Поэтому в настоящее время дать полную интерпретацию обнаруженным закономерностям пока не представляется возможным. Однако, опираясь на установленные для одноимпульсного экспонирования AgHal-фотоматериалов [8, 12], можно провести их сопоставление, высказав соответствующие соображения об их физической сущности.

Согласно известному механизму Р. Герни и Н. Мотта, для образования центров скрытого изображения (СИ) необходимо наличие в МК AgHal центров чувствительности. Допустим, что рассматриваемый МК, поглотивший при экспонировании N квантов света, имеет m таких центров. Предполагая, что каждый световой квант конвертируется в таком центре, то его мощность n (определяемая количеством атомов Ag) в отсутствие электрического поля, можно оценить как $n = N/m$. Тогда способность к проявлению МК AgHal, т.е. получение видимого изображения (ВИ), будет определяться соотношением между величиной n и порогом проявления n_0 . По мнению авторов [12], при $n \geq n_0$ МК будут проявлены полностью, а при $n \leq n_0$ – еще не выйдут из индукционного периода.

При световом экспонировании МК AgHal в электрическом поле появляются

новые возможности образования ВИ [12], схема реализации которых приведена на рис. 3. Здесь пунктирными линиями изображены условные границы областей скопления электронов под действием электрического поля напряженностями $6 \cdot 10^6$ В/м – 1 и $1,5 \cdot 10^7$ В/м – 2. Черными кружками – центры чувствительности. Рис. 3а демонстрирует случай, когда в области скопления электронов центры чувствительности отсутствуют, а рис. 3б – когда присутствует хотя бы один такой центр. Для случая на рис. 3а электроны, которые большую часть времени находятся в мелких потенциальных ямах, образуемых естественными дефектами МК, будут нейтрализоваться междоузельными ионами Ag^+ у этих же дефектов, что приведет к образованию одиночных атомов Ag. После релаксации поля в объеме МК AgHal произойдет перегруппировка атомарного серебра, в результате которой у центров чувствительности накопится некоторое количество атомов Ag. Однако при этом часть серебра СИ может остаться в мелкодисперсном состоянии (например, за счет образования термоустойчивых групп из нескольких атомов). Тогда мощность центров СИ окажется несколько меньше той, которая образуется в отсутствие электрического поля. Если же изначально мощность центров была достаточной для проявления МК (минимальный размер центров проявления представлен на рис. 3в, г пунктирными окружностями), то при действии электрического поля она может оказаться меньше порога проявления n_0 , как это показано на рис. 3в сплошными окружностями (Ag в мелкодисперсном состоянии изображено в виде светлых кружков). Следовательно, наложение электрического поля в момент светового экспонирования МК AgHal может перевести их из разряда проявляемых в разряд не проявляемых.

Локализация процесса образования СИ в малой области МК также может привести к противоположному результату, если в этой области окажется хотя бы один центр чувствительности (рис. 3г). В этом случае такой центр, представляющий собой глубокую потенциальную яму и, следовательно, эффективно захватывающий электроны, будет успешно конкурировать с естественными дефектами МК. И если электрическое поле будет удерживать электроны вблизи этого центра более 10^{-5} с (время образования СИ в МК AgHal [6]), то подавляющая часть Ag СИ выделится именно у этого центра, а все остальные центры не будут участвовать в процессе образования СИ. Если мощность центров

СИ в отсутствие электрического поля была недостаточной для проявления МК, то при наложении поля они смогут приобрести

такую способность за счет центра, на котором преимущественно накопилось серебро СИ (рис. 3з).

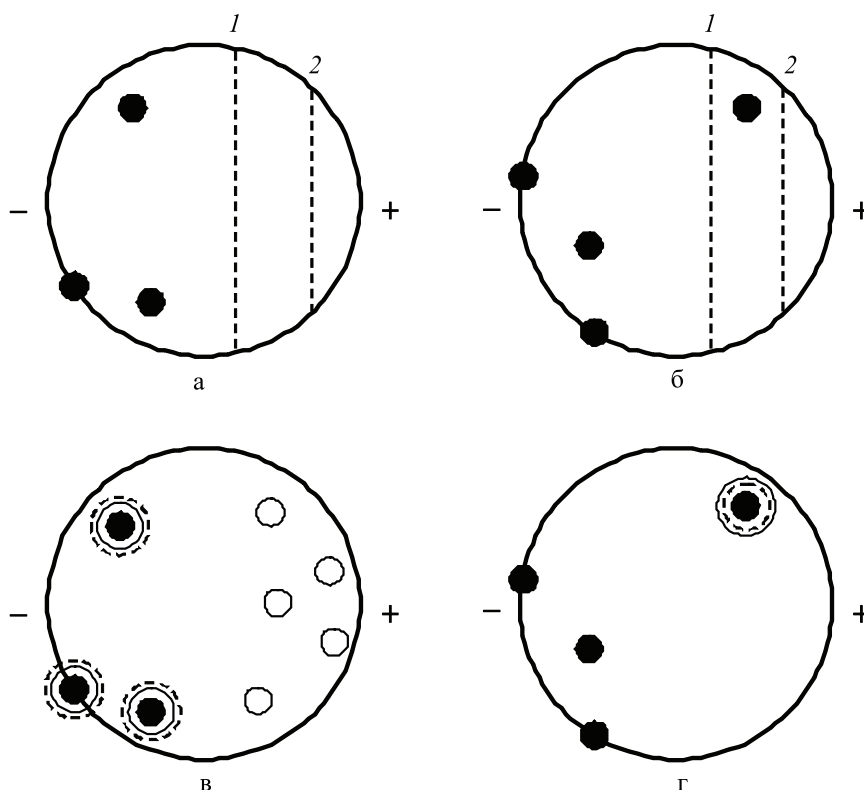


Рис. 3. Схема реализации «Эффекта Ротштейна» в МК AgHal при световом экспонировании фотоматериалов в импульсном электрическом поле (обозначения и пояснения в тексте)

Таким образом, в отдельных МК AgHal экспонируемого фотографического слоя электрическое поле может оказывать прямо противоположное действие. Отсюда следует, что знак и величина наблюдаемого эффекта η должны определяться соотношением между количеством случаев, изображенных на рис. 3а, б. Естественно предположить, что при прочих равных условиях это соотношение будет зависеть только от среднего числа центров чувствительности m , приходящихся на один эмульсионный МК AgHal. Вероятность того, что в области скопления электронов под действием поля окажется хотя бы один центр чувствительности, с увеличением среднего числа центров на МК m будет возрастать. Таким образом, положительный эффект η может наблюдаться только для фотографических эмульсий с большим числом центров чувствительности на МК [12].

Описанному механизму формирования ВИ хорошо соответствуют результаты экспонирования в электрическом поле фотопленки «RETINA» парными световыми импульсами с фиксированным периодом следования (см. п. 3.1). Если не касаться

изменения во времени напряженности импульса электрического поля на переднем и заднем фронтах, а принять его среднюю величину для исследованных вариантов $6 \cdot 10^6$ и $1,5 \cdot 10^7$ В/м, то для первого варианта граница области скопления электронов (область 1) будет значительно больше той, которую создает поле с напряженностью $1,5 \cdot 10^7$ В/м (область 2). Тогда очевидным является результат увеличения СЧС данной фотопленки в поле меньшей напряженности, чем в поле с его большей величиной за счет разницы границ названных областей, в которых может оказаться центр чувствительности. Как видно из рис. 3б, з такой центр в поле $1,5 \cdot 10^7$ В/м выходит за границу скопления электронов. Поэтому ранее наблюдавшимся увеличением СЧС (положительный знак эффекта η) у фотопленки «RETINA» в поле $6 \cdot 10^6$ В/м, в поле большей напряженности ведет к изменению знака η на противоположный. С тех же позиций можно объяснить наблюдаемые эффекты для фотопленки «PRIMAX». Уменьшение ее СЧС в поле $6 \cdot 10^6$ В/м и увеличение в поле $1,5 \cdot 10^7$ В/м означает не только попадание центров чувствительности в неболь-

шую область электронного скопления, но и указывает на преимущественное распределение таких центров по поверхности МК AgHal данной фотопленки.

Однако рамками предложенного механизма [12] нельзя однозначно объяснить результаты экспонирования фотопленок при изменяющемся T световых импульсов. Так, например, наблюдавшееся уменьшение СЧС у «RETINA» в поле $1,5 \cdot 10^7$ В/м при синхронизации обеих вспышек с его E_{\max} в поле той же величины ведет к существенному увеличению чувствительности фотопленки, когда с максимумом его напряженности синхронизирован только второй световой импульс. А для фотопленки «PRIMAX» совмещение второй вспышки как с максимумом напряженности импульса поля, так и его минимумом заднего фронта не меняет величин и знака эффекта η ни при $E \sim 6 \cdot 10^6$ В/м, ни при $E \sim 1,5 \cdot 10^7$ В/м, причем только при его отрицательной полярности. Из чего следует, что кроме описанного выше механизма должны реализовываться другие, в том числе с участием дефектов самой решетки МК AgHal, например, дефектов Френкеля, на физическое состояние которых способно оказать поле высокой напряженности [13]. Численное моделирование объемно-зарядовой поляризации таких дефектов в импульсном электрическом поле до 10^8 В/м и длительностью от 10^{-6} до $4 \cdot 10^{-3}$ с проведено в работе [13].

Заклучение

Полученные результаты свидетельствуют, что основной закономерностью взаимодействия БГР с AgHal-фотоматериалами является их многократное экспонирование световыми импульсами излучения разряда с максимумом в ближней ультрафиолетовой и фиолетовой области электромагнитного спектра, синхронизированных с одиночным импульсом электрического поля. Этот вывод справедлив не только для импульсного режима возбуждения БГР, но и для постоянного и переменного напряжений, т.к. многими теоретическими и экспериментальными исследованиями этого вида разряда доказан его импульсный характер горения независимо от форм возбуждающего напряжения [7]. Импульсы светового излучения, соответствующие импульсам разрядного тока, всегда возникают и погасают на уровне прикладываемого напряжения (или напряженности поля), не равном нулю. В зависимости от амплитудного значения последнего и его длительности (импульсный режим) или частоты изменения (переменное напряжение) количество разрядных импульсов и период их следования

могут значительно изменяться в пределах длительности высоковольтного импульса или полупериода переменного напряжения. Кроме первого разрядного импульса (случай импульсного режима возбуждения БГР) эти изменения для остальных носят стохастический характер. При этом длительность разрядного импульса оказывается на порядок меньше длительности импульса светового излучения, передний фронт которого (начало разгорания БГР) приходится на максимум амплитуды разрядного. Когда период следования последних оказывается соизмерим или меньше их длительности, то импульсы светового излучения сливаются в один с длительностью большей величины и амплитуды (интенсивности), удлинняя время горения БГР и, соответственно, время экспозиции фотоматериала.

Одновременное действие на рентгеновские фотоматериалы импульсов света и электрического поля приводит к проявлению «Эффекта Ротштейна», но подчиняющегося иным физическим закономерностям, отличным от ранее установленных для одноимпульсного режима экспонирования таких фотоматериалов [8, 12]. Изменение периода следования вспышек и их синхронизация с различными моментами изменения электрического поля напряженностями $6 \cdot 10^6$ и $1,5 \cdot 10^7$ В/м способно приводить к реализации «Эффекта Ротштейна» с разными величинами и знаками – увеличению или уменьшению СЧС AgHal-фотоматериалов по сравнению с исходной или не изменять ее. Не исключено, что установленные закономерности для двухимпульсного светового экспонирования фотоматериалов в электрическом поле для трех и более световых импульсов могут оказаться иными.

Обнаруженные закономерности формирования изображений в описанных условиях однозначно показывают их подчинение не только одновременной реализации сразу нескольким физическим механизмам, но и на сложный характер их взаимосвязи, определяемый как внешними условиями экспонирования AgHal-фотоматериалов, так и физическим состоянием МК AgHal их фоточувствительных слоев. В заключение отметим, что обнаружение новых эффектов изменения СЧС рентгеновских фотопленок при их экспонировании парными световыми импульсами в электрическом поле напряженностью до $1,5 \cdot 10^7$ В/м выходит за рамки ранее высказанных утверждений о том, что для крупнозернистых AgHal-фотоматериалов (к которым относятся исследованные фотопленки «RETINA» и «PRIMAX») в диапазоне E от 0 до 10^7 В/м их СЧС только понижается [14].

Список литературы

1. Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharge // Paper. – 1950. – № 1053. – P. 44–59.
2. Бабиков М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С. Техника высоких напряжений. М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 670 с.
3. Бойченко А.П. Исследование процессов взаимодействия слаботоочного лавинного разряда с галогенсеребряной фотоэмульсией: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Краснодар, 2002. – 148 с.
4. Бойченко А.П. Воздействие барьерного разряда лавинной формы на галогенсеребряный фотоматериал при заблокированной ионной проводимости // ФТП. – 2012. – Т. 46, № 4. – С. 525–529.
5. Бойченко А.П., Кузьминов И.Н. Исследование акустического излучения лавинного разряда, возбуждаемого одиночными видеоимпульсами в микронном промежутке с двухслойным диэлектриком на электроде // Процессы и явления в конденсированных средах: матер. Междунар. дистанц. научно-практич. конф. – Краснодар, 2005. – С. 82–97.
6. Мейкляр П.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. М.: Наука, 1972. – 400 с.
7. К вопросу о числе разрядов за период в газовых включениях в диэлектрике / Ч.М. Джуварлы, Г.В. Вечхайзер, Ю.В. Горин, П.В. Леонов // Acta technica ČSAV. – 1967. – № 6. – С. 676–684.
8. Певчев Ю.Ф., Калашникова В.И., Коновалова Л.П. О механизме влияния импульсного электрического поля на фотографический процесс // Журн. научн. и прикл. фото- и кинематогр. – 1970. – Т. 15, № 4. – С. 250–256.
9. 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. конф. Ч. 2. (Новосибирск, 26 дек. 2011 г.) – Новосибирск, 2011. – С. 39–43.
10. Андреев С.И., Новикова Г.М. Исследование объемного разряда наносекундной длительности в воздухе при атмосферном давлении // ЖТФ. – 1975. – Т. 65, № 8. – С. 1692–1703.
11. Картужанский А.Л. Критическая частота прерывистого освещения фотографического слоя и релаксационные процессы в эмульсионных кристаллах // Журн. научн. и прикл. фото- и кинематогр. – 1956. – Т. 1, № 1. – С. 10–18.
12. О возможности управления чувствительностью фотоэмульсионного детектора / В.И. Калашникова, А.А. Колубин, Б.Д. Лемешко, Ю.Ф. Певчев // Экспериментальные методы ядерной физики. Вып. 1. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 90–103.
13. Ханефт А.В., Крашенинин В.И. Кинетика поляризации и эффект термогенерации дефектов Френкеля в галогенидах серебра // Журн. научн. и прикл. фотогр. – 1998. – Т. 43, №1. – С. 34–43.
14. Диденко А.Я., Добродеев Н.А., Коноплич Р.Ф., Савкин В.И. К эффекту изменения светочувствительности фотографических материалов в электрическом поле // Журн. научн. и прикл. фото- и кинематогр. – 1991. – Т. 36, № 4. – С. 277–281.
2. Babikov M.A., Komarov N.S., Sergeev A.S. Tehnika vysokih naprjazhenij. M., L.: Gosjenergoizdat, 1963. 670 p.
3. Bojchenko A.P. Issledovanie processov vzaimodejstvija slabotochnogo lavinnogo razrjada s galogenserebrjanoj fotojemuľ'siej: dis.... kand. fiz.-mat. nauk. Krasnodar, 2002. 148 p.
4. Bojchenko A.P. Vozdejstvije bar'ernogo razrjada lavinnoj formy na galogenserebrjanyj fotomaterial pri zablockirovannoj ionnoj provodimosti // FTP. 2012. T. 46, no. 4. pp. 525–529.
5. Bojchenko A.P., Kuz'minov I.N. Issledovanie akusticheskogo izluchenija lavinnogo razrjada, vzbuzhdaemogo odinocnymi videoimpul'sami v mikronnom promezhtke s dvuhslajnym dijelektrikom na jelektrode // Processy i javlenija v kondensirovannyh sredah: Mater. Mezhdunar. distanc. nauchno-praktich. konf. Krasnodar, 2005. pp. 82–97.
6. Mejkljar P.V. Fizicheskie processy pri obrazovanii skrytogo fotograficheskogo izobrazhenija. M.: Nauka, 1972. 400 p.
7. Dzhubarly Ch.M., Vechhajzer G.V., Gorin Ju.V., Leonov P.V. K voprosu o chisle razrjadov za period v gazovyh vključenijah v dijelektrike // Acta technica ČSAV. 1967. no. 6. pp. 676–684.
8. Pevchev Ju.F., Kalashnikova V.I., Konovalova L.P. O mehanizme vlijanija impul'snogo jelektricheskogo polja na fotograficheskij process // Zhurn. nauchn. i prikl. foto- i kinematogr. – 1970. T. 15, no. 4. pp. 250–256.
9. Bojchenko A.P., Honjakin S.V. Issledovanie vlijanija sostavljajuwih izluchenija 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.
10. Andreev S.I., Novikova G.M. Issledovanie ob'emnogo razrjada nanosekundnoj dlitel'nosti v vozduhe pri atmosfernom davlenii // ZhTF. 1975. T. 65, no. 8. pp. 1692–1703.
11. Kartuzhanskij A.L. Kriticheskaja chastota preryvistogo osvewenija fotograficheskogo sloja i relaksacionnye processy v jemuľ'sionnyh kristallah // Zhurn. nauchn. i prikl. foto- i kinematogr. 1956. T. 1, no. 1. pp. 10–18.
12. Kalashnikova V.I., Koljubin A.A., Lemesko B.D., Pevchev Ju.F. O vozmozhnosti upravlenija chuvstvitel'nost'ju fotojemuľ'sionnogo detektora // Jeksperimental'nye metody jadernoj fiziki. Vyp. 1. M.: Atomizdat, 1975. pp. 90–103.
13. Haneft A.V., Krashenin V.I. Kinetika poljarizacii i jeffekt termogeneracii defektov Frenkelja v galogenidah serebra // Zhurn. nauchn. i prikl. fotogr. 1998. T. 43, no.1. pp. 34–43.
14. Didenko A.Ja., Dobrodeev N.A., Konoplich R.F., Savkin V.I. K jeffektu izmenenija svetochuvstvitel'nosti fotograficheskikh materialov v jelektricheskom pole // Zhurn. nauchn. i prikl. foto- i kinematogr. 1991. T. 36, no. 4. pp. 277–281.

References

1. Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharge // Paper. 1950. no. 1053. pp. 44–59.

Рецензенты:

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

Дерябин М.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики Ставропольского государственного университета, г. Ставрополь.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.