

СРЕДЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

УДК 535.135 : 621.397

В. Ю. БАЖЕНОВ, Н. М. БУРЫКИН, М. В. ВАСНЕЦОВ,
М. С. СОСКИН, В. Б. ТАРАНЕНКО

(Киев)

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ В БИХРОМИРОВАННОЙ ЖЕЛАТИНЕ

Введение. Интерес к бихромированной желатине (БХЖ) вызван, прежде всего, уникальным сочетанием голографических характеристик этой регистрирующей среды: дифракционной эффективности, близкой к 100% при очень низких поглощении и уровне рассеянного света; разрешающей способности более 7000 мм^{-1} ; оптической прочности $1 \div 4 \text{ Дж/см}^2$ при воздействии гигантских импульсов лазерного излучения в видимой и ближней ИК-областях спектра; хороших эксплуатационных свойств при использовании защитных покрытий. Благодаря этому БХЖ все шире применяется для записи и хранения оптической информации, создания голографических оптических элементов, художественных голограмм и т. д. [1—3].

Светочувствительность желатины, сенсibilизированной солями хромовой кислоты, известна уже более ста лет. Сначала оптическая информация регистрировалась в виде модуляции толщины слоя (рельефная запись), возникающей за счет того, что экспонированные области БХЖ становятся нерастворимыми в воде. Этот способ записи, однако, не получил распространения в голографии. В 1968 г. в [4] была предложена объемная запись в БХЖ в виде пространственной модуляции показателя преломления слоя. Этот способ заключался в предварительном поддубливании слоя желатины и проявлении экспонированного слоя БХЖ в воде и изопропиловом спирте. Именно объемная запись привлекла внимание исследователей в области голографии, и к настоящему времени выполнено значительное количество работ, посвященных анализу механизмов объемной записи в БХЖ [5—10]. Тем не менее, процессы, протекающие при формировании объемных голограмм, изучены еще недостаточно полно, и до сих пор остается спорным вопрос о физической природе модуляции показателя преломления слоя. Это, в частности, затрудняет управление процессом голографической записи в БХЖ и получение голограмм с заданными хорошо воспроизводимыми параметрами.

Целью данной статьи является исследование процессов и механизмов голографической записи в БХЖ как на стадии скрытого изображения (СИ), так и на стадии проявления. В работе рассматриваются направленность фотоиндуцированных превращений сенсibilизатора и связанное с ними изменение оптических характеристик слоя, а также обсуждается модель локальных деформаций слоя, описывающая свойства объемных голограмм в БХЖ.

Слои БХЖ приготавливались и обрабатывались по методу Лина [11] из голографических фотопластинок ПЭ-2, толщина которых составляла примерно 10 мкм. Голографическая запись осуществлялась по симметричной схеме с помощью He—Cd-лазера ($\lambda = 0,44 \text{ мкм}$) при плотности мощности около $0,5 \text{ мВт/см}^2$.

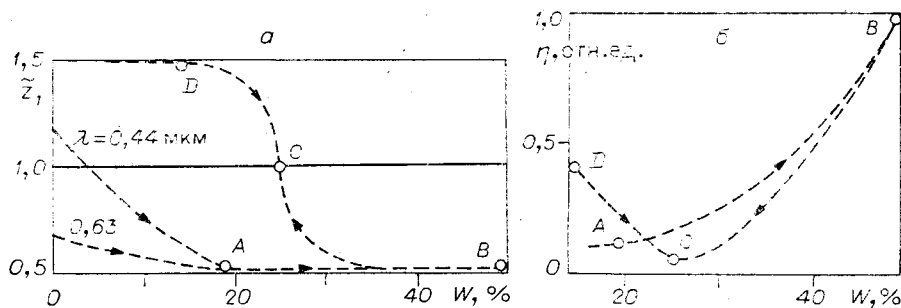


Рис. 1. Зависимость безразмерной координаты первой плоскости саморепродукции решетки СИ \tilde{z}_1 (а) и дифракционной эффективности решетки СИ (б) от содержания воды в слое W .

Стадия скрытого изображения. Исходный сенсibilизированный слой желатины содержит соединение шестивалентного хрома (Cr VI). При поглощении света происходят окисление функциональных групп аминокислотных остатков молекулы желатины и восстановление хрома. В [10] на основании данных ИК-спектроскопии и ЭПР была предложена следующая схема фотоиндуцированного восстановления комплексов хрома. Первичный процесс состоит в двухэлектронном восстановлении, т. е. в переходе комплексов Cr VI в комплексы Cr IV. Вторичный процесс протекает с участием молекул воды, содержащихся в слое, и заключается в переходе комплексов Cr IV в комплексы Cr V, а затем и в комплексы Cr III, которые, как известно, осуществляют прочную поперечную сшивку молекул желатины (фотоудбление).

При таких фотопревращениях происходит изменение спектральных полос поглощения сенсibilизатора в слое [10], а следовательно, на заданной длине волны излучения λ изменяется как коэффициент поглощения κ , так и связанный с ним показатель преломления n . В этом случае для голографической решетки СИ с периодом Λ и направлением модуляции вдоль оси x комплексный коэффициент пропускания слоя имеет вид

$$T(x) = \exp(-A) \exp[(A + i\Phi) \cos(2\pi x/\Lambda)], \quad (1)$$

где $A = (\pi/\lambda)\Delta\kappa h$, $\Phi = (\pi/\lambda)\Delta n h$, Δn , $\Delta\kappa$ — амплитуды модуляций показателя преломления и коэффициента поглощения слоя соответственно, h — толщина слоя. Отметим, что такое выражение для Φ справедливо только в том случае, когда слой находится в стеклообразном состоянии (содержание воды в слое $W < 15\%$). Если же слой находится в высокоэластичном состоянии, необходимо учитывать изменение толщины слоя Δh .

Величину и знак отношения Φ/A можно определить с помощью метода саморепродукции решетки СИ [12]. Область, в которой дифрагированные на решетке СИ пучки перекрываются и интерферируют между собой, содержит эквидистантно расположенные плоскости максимального контраста интерференционной картины (плоскости саморепродукции решетки), причем расстояние от поверхности решетки до первой плоскости саморепродукции z_1 определяется величиной и знаком отношения Φ/A в соответствии с формулой

$$z_1 = (\Lambda^2/\lambda)[1 + (1/\pi) \operatorname{arctg}(-\Phi/A)]. \quad (2)$$

Для удобства анализа далее используется безразмерная координата $\tilde{z}_1 = z_1\lambda/\Lambda^2$. На рис. 1, а представлена зависимость \tilde{z}_1 от содержания воды в слое W для решетки СИ с $\Lambda = 50$ мкм.

Из рисунка следует, что в слое с $W = 0$ \tilde{z}_1 соответствует амплитудно-фазовому характеру решетки СИ, причем на $\lambda = 0,63$ мкм максимумы амплитудной и фазовой составляющих решетки совпадают в пространстве ($\Phi/A > 0$), а на $\lambda = 0,44$ мкм они сдвинуты на полпериода ($\Phi/A < 0$). Дополнительные измерения показывают, что при экспонировании

БХЖ κ увеличивается по всему видимому диапазону спектра. Следовательно, в экспонированных областях слоя показатель преломления возрастает ($\Delta n > 0$) на $\lambda = 0,63$ мкм и уменьшается ($\Delta n < 0$) на $\lambda = 0,44$ мкм.

Полученный результат можно объяснить изменением полос поглощения слоя БХЖ, происходящим при экспонировании, с учетом связи между n и κ . С использованием конкретного вида оптических спектров поглощения [10] спектр исходного сенсibilизатора в матрице желатинной аппроксимировался двумя лоренцевыми контурами с максимумами на 0,27 и 0,36 мкм, а спектр экспонированного слоя представлялся в виде суммы спектров поглощения оставшегося сенсibilизатора и продукта его фотовосстановления. Расчет показывает, что независимо от того, какая часть сенсibilизатора подверглась фотовосстановлению, $\Delta n = 0$ при $\lambda \approx 0,5$ мкм (запись чисто амплитудная), $\Delta n < 0$ при $\lambda < 0,5$ мкм и $\Delta n > 0$ при $\lambda > 0,5$ мкм, что согласуется с результатом эксперимента по саморепродукции решетки СИ при $W = 0$ (см. рис. 1, а).

Сам факт записи решетки СИ в слое с $W = 0$ свидетельствует о том, что первичный фотоиндуцированный процесс (переход $\text{CrVI} \rightarrow \text{CrIV}$) происходит без участия воды. При увеличении W в экспонированном слое начинают протекать вторичные процессы: сигнал ЭПР CrV значительно возрастает [10]. Как видно из рис. 1, а, з, при этом стремится к 0,5, т. е. решетка СИ становится чисто фазовой. Наблюдаемое темновое изменение характера решетки СИ определяется несколькими одновременно протекающими процессами: изменением спектральных полос поглощения (при увеличении W спектр экспонированного слоя приближается к спектру поглощения исходного слоя БХЖ [10], а значит Δn и $\Delta \kappa$ уменьшаются); понижением влагосодержания слоя из-за расхода воды на темновые химические реакции; поглощением воды из окружающего воздуха и неэкспонированных областей слоя. Следует отметить, что уменьшение Δn и темновой спад дифракционной эффективности решетки СИ при $W = 15\%$ наблюдались в [10, 12].

При $W > 20\%$ слой находится в высокоэластичном состоянии. Процессы, протекающие при столь высоком влагосодержании слоя, во многом сходны с процессами, происходящими при проявлении слоя в воде: из-за набухания толщина слоя увеличивается и одновременно в экспонированных областях слоя осуществляется переход $\text{CrV} \rightarrow \text{CrIII}$, обеспечивающий фотодубление слоя. В этом случае в выражении для амплитуды модуляции фазового набега Φ необходимо учесть изменение толщины слоя Δh :

$$\Phi = (\pi/\lambda)[\Delta n h + \Delta h(n - 1)]. \quad (3)$$

При повышении содержания воды в слое наблюдается увеличение дифракционной эффективности решетки СИ (см. рис. 1, б, $A \rightarrow B$) и решетка остается чисто фазовой с $\Phi > 0$ независимо от длины волны считывающего излучения (см. рис. 1, а). При высыхании слоя z_1 изменяется от 0,5 до 1,5 (см. рис. 1, а, $B \rightarrow D$), что свидетельствует об изменении знака Φ в точке C . Одновременно дифракционная эффективность проходит через минимум (см. рис. 1, б, точка C). Таким образом, при первом цикле «увлажнение — сушка» происходят необратимые изменения характеристик решетки СИ, а при последующих циклах фазовая модуляция решетки СИ изменяется обратимо (см. рис. 1, $D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$).

Необратимость процесса при первом цикле «увлажнение — сушка» связана с переходом комплексов CrV в комплексы CrIII (скорость которого возрастает с увеличением W [10, 13]) и набуханием слоя, при котором происходит его деформация, т. е. изменяются структура и плотность трехмерной молекулярной сетки желатинной. Комплексы CrIII обладают значительно более сильным дубящим действием по сравнению с комплексами CrV [14] и поэтому препятствуют возвращению набухших экспонированных областей слоя в исходное состояние, при этом на поверхности слоя образуется рельеф (рис. 2, б). После завершения дубления желатинной комплексами CrIII структурно-плотностные изменения слоя проходят обратимо.

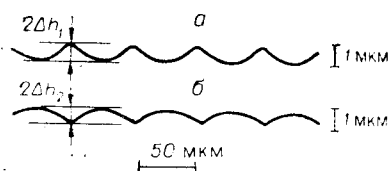


Рис. 2. Поверхностный рельеф низкочастотной решетки ($\Lambda = 50$ мкм), полученный с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4: а — для слоя, проявленного по стандартной методике; б — для слоя, проявленного без фиксирования в изо-пропиловом спирте.

Стадия проявления. При проявлении слоя в воде одновременно протекают следующие процессы: набухание слоя, приводящее к деформации трехмерной молекулярной сетки желатины; переход комплексов CgV в комплексы $CgIII$, которые осуществляют фотодубление; вымывание непрореагировавшего сенсibilизатора. При дегидратации изопропиловый спирт замещает воду и переводит слой в стеклообразное состояние, фиксируя тем самым деформированное состояние слоя.

Рассмотрим вначале проявление низкочастотных решеток, для которых $\Lambda \geq h$. В этом случае поперечные деформации относительно малы из-за сдерживающего влияния подложки и деформация слоя происходит практически только в z -направлении (перпендикулярно поверхности слоя). Экспонированные области деформируются в меньшей мере (благодаря фотодублению), чем неэкспонированные, и поэтому на поверхности слоя образуется рельеф. Изопропиловый спирт фиксирует его (рис. 2, а). Это состояние слоя неустойчиво, и при увлажнении слой релаксирует: неэкспонированные области возвращаются к исходной толщине, а экспонированные сохраняют остаточную деформацию, поскольку фотосшивка молекул в них осуществляется в набухшем состоянии. При этом происходит обращение рельефа (см. рис. 2, б). К такому же результату приводит и проявление слоя без фиксирования в изопропиловом спирте. После релаксации слой может быть проявлен вновь с восстановлением характеристик решетки.

Проанализируем характер деформации слоя на основании уравнения Флори, описывающего процесс набухания слоя на подложке [16]:

$$(1/v_1)[\ln(1 - h_0/h) + h_0/h + \chi_1(h_0/h)^2] = Nh/2v_0h_0, \quad (4)$$

где h_0 и h — толщины слоя в исходном и набухшем состояниях соответственно, v_1 и v_0 — молярные объемы растворителя и желатины соответственно, N — среднее число поперечных спивок на одну молекулу желатины, зависящее как от исходной задубленности слоя (N_0), так и от количества фотоспивок (N_E). Уравнение (4) решалось численным методом при $v_1 = 18$ см³, $v_0 = 67\,000$ см³, $\chi_1 = 0,5$ [16]. Результат расчета представлен на рис. 3. Видно, что деформация слоя при набухании в воде имеет существенно нелинейную зависимость от числа поперечных спивок. С учетом полученной зависимости h/h_0 от N был построен профиль рельефа решетки (N_0 и N_E , взятые для расчета, соответствуют реальным условиям записи). Как видно из рис. 3, профиль отличается от синусоидального и совпадает с наблюдаемым в эксперименте (см. рис. 2, а).

Для рассматриваемых низкочастотных решеток амплитуда модуляции фазового набега имеет вид (3), а дифракционная эффективность

$$\eta = J_1^2 \{(\pi/\lambda)[\Delta nh + \Delta h(n - 1)]\}, \quad (5)$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка. Для того чтобы разделить вклад Δn и Δh в η , исследуемые решетки помещались в плоскопараллельную кювету с иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой близок к среднему показателю преломления решеток ($n = 1,52$). При этом влияние рельефа устранялось и вклад в η вносила только модуляция показателя преломления (Δn). Эксперимент показал, что η увеличивалась для решетки, проявленной по стандартной методике, и уменьшалась практически до нуля (т. е. $\Delta n \approx 0$) для решетки, проявленной без фиксирования в изопропиловом спирте (релаксированной решетки).

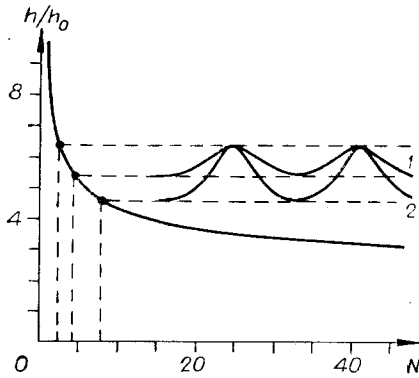


Рис. 3. Расчетная зависимость набухания слоя желатины в воде h/h_0 от количества поперечных сшивок N и профиль рельефа для низкочастотной решетки:
1 — при $N_0=2$, $N_E=2$; 2 — при $N_0=2$, $N_E=6$.

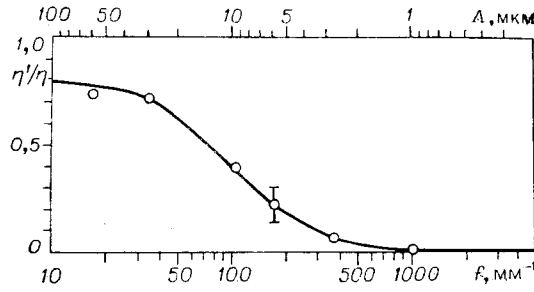


Рис. 4. Зависимость отношения дифракционных эффективностей релаксированной решетки и решетки, проявленной по стандартной методике, η'/η от пространственной частоты f .

Показатель преломления слоя n связан с объемной плотностью цепей молекулярной сетки ν/V формулой Лорентц — Лоренца [15]:

$$(n^2 - 1)/(n^2 + 2) = (4\pi/3)(\nu\alpha/V), \quad (6)$$

где ν — число цепей в объеме V , α — средняя поляризуемость цепи молекулярной сетки (цепь — участок молекулы полимера от одной поперечной сшивки до другой [15]). Так как для релаксированной решетки $\Delta n \approx 0$, несмотря на заметное различие в толщинах экспонированных и неэкспонированных областей (см. рис. 2, б), то, во-первых, согласно (3) имеем $\Phi' = (\pi/\lambda)(n-1)\Delta h_2$ и, во-вторых, из (6) следует, что $\nu\alpha/h = \text{const}$. Предполагая, что деформация слоя, связанная с его проявлением, не приводит к изменению пространственного распределения $\nu\alpha$, из (6) при малых деформациях получим $\Delta n = -0,6(\Delta h_1 + \Delta h_2)/h$ (обозначения даны на рис. 2). Подстановка этого выражения в (3) и (5) дает $\eta'/\eta \approx (\Phi'/\Phi)^2 = 0,7$. Эта оценка хорошо согласуется с результатом эксперимента (рис. 4). Таким образом, основные свойства низкочастотных решеток хорошо описываются с учетом модуляции относительной деформации слоя только в z -направлении.

Спад зависимости η'/η от f на высоких пространственных частотах (см. рис. 4) указывает на то, что для высокочастотных решеток рассмотрение деформаций только в z -направлении оказывается недостаточным и необходимо учитывать деформации в x -направлении (в направлении вектора решетки). Необходимость такого учета подтверждается также результатами измерений рельефа высокочастотных решеток [8, 10], анализ которых показывает, что глубина рельефа существенно меньше необходимой для объяснения наблюдаемой модуляции фазового набега на решетке.

Качественным результатом анализа уравнения Флори [16] в предположении отсутствия средней деформации в x -направлении ($\bar{\sigma}_x = 0$) является то, что локальная относительная деформация $\sigma_x < 0$ в экспонированных областях и $\sigma_x > 0$ — в неэкспонированных. Деформация молекулярной сетки приводит к анизотропии статистики распределения цепей молекулярной сетки, т. е. к появлению двулучепреломления [15]. Локальная деформация высокочастотных решеток должна приводить к модулированному двулучепреломлению слоя и, следовательно, к различию Δn_x и Δn_y (индексы соответствуют p - и s -поляризациям излучения, падающего на решетку в плоскости ее дисперсии), что и было обнаружено в [17].

Оценим значение амплитуды относительной деформации $\Delta\sigma_x$ из соотношения

$$\Delta\sigma_x = (\Delta n_y - \Delta n_x)/\gamma,$$

где γ — деформационно-оптический коэффициент. Эксперимент показывает, что $\Delta n_x = 0,75\Delta n_y$, т. е. $\Delta \sigma_x \approx 0,25\Delta n_y/\gamma$. Из измерений зависимости двулучепреломления слоя от однородной деформации было найдено, что $\gamma = -0,16$. Тогда $\Delta \sigma_x \approx -1,6\Delta n_y$, что хорошо согласуется с оценкой по формуле (6). Таким образом, свойства высокочастотных решеток описываются преимущественными деформациями в x -направлении.

Заключение. Итак, проведенные исследования позволили описать физическую картину процессов формирования объемных голограмм в бихромированной желатине. Показано, что оптические характеристики слоя на стадии скрытого изображения существенно зависят от содержания в слое воды. Так, при низком содержании воды, когда слой находится в стеклообразном состоянии, изменения показателя преломления и коэффициента поглощения определяются изменением спектральных полос поглощения слоя, связанным с фотопревращениями (переход CrVI в CrIV и затем в CrV). Когда же слой находится в высокоэластичном состоянии (высокое содержание воды), оптические характеристики решетки скрытого изображения хорошо описываются вариацией толщины слоя, происходящей из-за неоднородного набухания. Развита модель локальных деформаций слоя (структурно-плотностная модель) описывает основные оптические характеристики голограмм после их проявления. Показано, что свойства низкочастотных решеток определяются преимущественными деформациями, перпендикулярными поверхности слоя, а свойства высокочастотных решеток — деформациями в направлении вектора решетки. Степень деформации слоя зависит от температуры проявляющих реагентов, причем с ростом температуры может быть превышен предел прочности молекулярной сетки и могут образоваться локальные разрывы слоя, которые наблюдались в [5]. И, наоборот, при понижении температуры модуляция показателя преломления, связанная с локальными деформациями, может стать сравнимой с модуляцией, обусловленной модуляцией концентрации комплексов CrIII [6, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Chang B. J., Leonard C. D. Dichromated gelatin for the fabrication of holographic optical elements.— Appl. Opt., 1979, vol. 18, p. 2407.
2. Soskin M. S., Taranenko V. B. Laser holographic wavelength selectors recorded in dichromated gelatin films.— SPIE, 1979, vol. 213, p. 57.
3. Bloss W. H., Griesinger M., Reinhardt E. R. Dispersive concentrating systems based on transmission phase holograms for solar applications.— Appl. Opt., 1982, vol. 21, p. 3739.
4. Shankoff T. A. Phase holograms in dichromated gelatin.— Appl. Opt., 1968, vol. 7, p. 2101.
5. Curran R. K., Shankoff T. A. The mechanism of hologram formation in dichromated gelatin.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, p. 1651.
6. Meyerhofer D. Phase holograms in dichromated gelatin.— RCA Review, 1972, vol. 33, p. 110.
7. Chang B. J. Dichromated gelatin holograms and their applications.— Opt. Eng., 1980, vol. 19, p. 642.
8. Samoilovich D. M., Zeichner A., Friesem A. A. The mechanism of volume hologram formation in dichromated gelatin.— Photogr. Sci. Eng., 1980, vol. 24, p. 161.
9. Sjölander S. Dichromated gelatin and the mechanism of hologram formation.— Photogr. Sci. Eng., 1981, vol. 25, p. 112.
10. Баженов В. Ю. и др. Исследование процессов образования объемных фазовых голограмм в слоях бихромированной желатины.— УФЖ, 1982, т. 27, с. 30.
11. Lin L. H. Hologram formation in hardened dichromated gelatin films.— Appl. Opt., 1969, vol. 8, p. 963.
12. Баженов В. Ю. и др. Исследование изменений оптических характеристик слоев бихромированной желатины при голографической записи. Стадия скрытого изображения.— УФЖ, 1982, т. 27, с. 1018.
13. Лялецкая О. О. и др. Спектроскопические исследования фотовосстановления бихромата аммония в поливинилово спирте.— УХЖ, 1980, т. 46, с. 18.
14. Шерстюк В. П. и др. Образование хрома V и хрома III при фотохимическом и термическом дублировании хромированного поливинилового спирта.— ЖНПФик, 1980, т. 25, с. 40.
15. Флори П. Статистическая механика цепных молекул.— М.: Мир, 1971.

16. Robinson I. D. Swelling of coated gelatin-silver bromide emulsions.— Photogr. Sci. Eng., 1964, vol. 8, p. 220.
17. Баженов В. Ю. и др. Наведенное двулучепреломление объемных решеток в слоях бихромированной желатины.— УФЖ, 1983, т. 28, с. 308.

Поступила в редакцию 23 марта 1983 г.

УДК 772.293 : 77.023.41

В. И. ЕРОШКИН, А. В. СЕМЕШКО, А. С. ТРОФИМОВ
(Новосибирск)

ЯВЛЕНИЕ СОЛЯРИЗАЦИИ НА ФЕРРИОКСАЛАТНЫХ ФОТОСЛОЯХ С ФИЗИЧЕСКИМ ПРОЯВЛЕНИЕМ

В опубликованных ранее работах [1—4] было показано, что при продолжительном экспонировании фотослоев, содержащих ферриоксалат калия или оксалат железа и хлористый палладий, после проявления в бессеребряных физических проявителях (ФП) на характеристических кривых (ХК) наблюдается падение плотности проявленного изображения с увеличением экспозиции. Аналогичное явление на галогенсеребряных фотослоях носит название соляризации.

Изучение этого явления представляет как теоретический интерес в плане определения условий формирования центров скрытого изображения (ЦСИ), их распределения и устойчивости в растворах ФП, так и практический в плане создания новых бессеребряных прямопозитивных фото-материалов.

Соляризация при бессеребряном физическом проявлении является, по-видимому, комбинацией нескольких причин: условий получения металлческих ЦСИ и их проявления в растворах ФП. Представляется интересным рассмотреть влияние некоторых факторов на форму ХК, получаемых при проявлении в никель-гипофосфитном ФП.

В процессах с физическим проявлением ЦСИ можно получить двумя способами: 1) непосредственно во время экспонирования материала (фотолитическое получение); 2) в результате восстановления ионов благородных металлов продуктами фотолиза при обработке экспонированного материала раствором соответствующей соли (химическое получение). Ферриоксалатные фотослои представляют удобную систему для получения ЦСИ как 1-м, так и 2-м способом.

Для получения ЦСИ 1-м способом целлофановая пленка или хроматографическая бумага пропитывалась в растворах, содержащих $K_3[Fe(C_2O_4)_3]$ или $Fe_2(C_2O_4)_3$ с добавкой хлористого палладия. Во 2-м способе целлофановая пленка пропитывалась в растворе с $K_3[Fe(C_2O_4)_3]$ и после экспонирования погружалась в $1 \cdot 10^{-3}$ М раствор $PdCl_2$. Состав использовавшихся светочувствительных композиций приведен в таблице.

В раствор композиции вводилась щавелевая кислота для повышения растворимости и предотвращения гидролиза оксалата железа. Сухие слои экспонировались через стекло светом лампы ПРК-2М. Освещенность в плоскости экспонирования составляла $2,5 \cdot 10^{-3}$ Вт/см². Мощность излучения определялась с помощью ферриоксалатного актиометра [5]. Экспонированные образцы проявлялись в никель-гипофосфитном ФП, содержащем, г/л: $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, 24; $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 5,5H_2O$, 45; $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$, 24; NH_4Cl , 30; NH_4OH или $NaOH$ до необходимого значения pH. Фотоматериал на целлофановой пленке проявлялся при 20 °С и pH 8 (NH_4OH), а на бумажной подложке — при 40 °С и pH 12 ($NaOH$). Величина pH измерялась стеклянным электродом на pH-метре, оптические плотности проявленных образцов — на денситометре ДФЭ-10 и фотометре ФМ-58.