

ПОПЕРЕЧНЫЙ И ПРОДОЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ВЕЙГЕРТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ Ag—AgHal

Л. А. Агеев и В. К. Милославский

Исследован эффект Вейгерта (ЭВ) в тонких гранулярных пленках Ag—AgCl, возникающий после облучения линейно поляризованным излучением лазера ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) и проявляющийся в расщеплении резонансной полосы поглощения Ag в AgCl на две компоненты, соответствующие измерениям при $E \parallel E_0$ и $E \perp E_0$ (E_0 — вектор поляризации лазерного пучка, E — измерительного). Положение полос подчиняется неравенству $\omega_{\parallel} > \omega_{\perp} > \omega_1$ (ω_1 — положение в необлученном образце); разность частот $\omega_{\parallel} - \omega_{\perp}$ возрастает с ростом времени облучения и достигает насыщения. С помощью электронной микроскопии установлена связь ЭВ в Ag—AgCl с образованием цепочек из гранул Ag, вытянутых преимущественно поперек E_0 . Сопоставление с ЭВ в пленках Ag—AgI позволяет разделить ЭВ на поперечный и продольный в соответствии с ориентацией цепочек относительно E_0 . Обсуждается механизм возникновения поперечного и продольного ЭВ. Для объяснения поперечного ЭВ предполагается эмиссия фотоэлектронов из гранул в направлении E_0 и существование большого числа центров захвата фотоэлектронов на границах зерен AgCl.

Несмотря на длительную историю исследования [1] (эффект был обнаружен в 1920 г. [2]), эффект Вейгерта (ЭВ) до сих пор принадлежит к мало изученным явлениям, наблюдаемым в фоточувствительных объектах. Явление заключается в появлении фотоиндуцированного дихроизма в фотоэмульсиях или кристаллах AgHal при их облучении линейно поляризованным нефотоактивным (обычно красным) светом. ЭВ наблюдается в объектах, содержащих избыточный металл (серебро) в мелкодисперсном состоянии, и, таким образом, связывается с фотоструктурными превращениями, возникающими при действии света на металлические гранулы и приводящими в итоге к оптической анизотропии образцов. Структурное состояние дихроичных образцов изучалось слабо, в связи с чем неясен механизм фотоструктурных превращений и природа сопровождающих их оптических явлений.

Исследования, проведенные нами [3, 4] на тонкопленочных образцах Ag—AgI, показали, что тонкие пленки фоточувствительных материалов, содержащих гранулярное серебро, являются очень удобным объектом для исследования ЭВ. С одной стороны, метод приготовления образцов (вакуумное напыление гранулярных пленок Ag, последующее иодирование) обеспечивает небольшой размер гранул на подложке, что в свою очередь определяет хорошее оптическое качество образцов. В тонких пленках отсутствует рассеяние света, полосы поглощения гранулярного серебра достаточно узки, возникающий в результате облучения дихроизм легко наблюдается и измеряется. Во-вторых, в отличие от кристаллов фотоструктурные превращения возникают в практически двумерном коллоиде, что упрощает теоретическую интерпретацию ЭВ. Гранулы Ag хорошо сцеплены с подложкой и дихроизм сохраняется в пленках Ag после удаления AgI. Наконец, пленки серебра легко изучаются методами просвечивающей электронной микроскопии, что снижает трудности, связанные с электронной микроскопией кристаллов галогенидов серебра.

Было обнаружено, что фотоиндуцированный дихроизм в пленках $\text{Ag}-\text{AgI}$ возникает в результате образования цепочек из сферических гранул Ag , преимущественно вытянутых вдоль направления электрического вектора облучающего света. Дихроизм в $\text{Ag}-\text{AgI}$ противоположен по знаку дихроизму, наблюдаемому в других сходных объектах (в кристаллах $\text{AgBr}-\text{Ag}$, $\text{AgCl}-\text{Ag}$ [5], $\text{NaCl}-\text{Na}$ [6], фотоэмульсиях на основе AgBr , AgCl). В связи с этим представляло интерес изучение ЭВ в тонких пленках $\text{Ag}-\text{AgCl}$, содержащих гранулы Ag в виде двумерного коллоида. Об исследовании ЭВ в пленках $\text{Ag}-\text{AgCl}$ уже сообщалось [7], однако метод приготовления (одновременное испарение Ag и AgCl) не обеспечивал двумерности коллоида.

Методы приготовления и исследования дихроичных пленок $\text{Ag}-\text{AgCl}$

Методика приготовления образцов проста. Вначале вакуумным осаждением на нагретую до 300°C стеклянную подложку наносится тонкая пленка Ag . Толщина пленки задавалась навеской серебра и подбиралась так, чтобы пленка состояла из гранул Ag размером $100 \div 200 \text{ \AA}$. Затем подложка охлаждалась до комнатной температуры и осаждалась тонкая ($\sim 100 \text{ \AA}$) пленка AgCl . Толщина пленки AgCl измерялась на контрольном образце методом Толанского. Для получения пленки $\text{Ag}-\text{AgCl}$ применялась также обработка пленок Ag в парах Cl_2 . Оптические свойства и ЭВ в пленках $\text{Ag}-\text{AgCl}$, приготовленных двумя методами, оказались сходными, что позволило затем проводить исследования пленок, полученных более удобным первым способом.

Пленки $\text{Ag}-\text{AgCl}$ подвергались затем облучению линейно поляризованным излучением $\text{He}-\text{Ne}$ лазера ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$, мощность $\sim 40 \text{ мВт}$, диаметр пучка 4 мм) при различных временах экспозиции. В пленках возникал дихроизм, легко наблюдаемый по изменению окраски в поляризованном свете на облученном участке. После выполнения оптических измерений пленки $\text{Ag}-\text{AgCl}$ обрабатывались в фиксаже. В результате фиксирования на подложке остается гранулярная пленка Ag , сохраняющая результат фотоструктурных превращений при ЭВ. Дихроичные пленки Ag подвергались оптическим и электронномикроскопическим исследованиям.

Спектры пропускания пленок $\text{Ag}-\text{AgCl}$ и Ag изучались на спектрофотометре СФ-4 в диапазоне $360 \div 1000 \text{ нм}$. Спектры дихроичных пленок измерялись в поляризованном свете при поляризациях $\mathbf{E} \parallel \mathbf{E}_0$ и $\mathbf{E} \perp \mathbf{E}_0$, где \mathbf{E} и \mathbf{E}_0 — векторы поляризации измерительного и лазерного пучка соответственно. Электронномикроскопические снимки пленок Ag были получены под микроскопом ЭМ-7.

Результаты оптических и электронномикроскопических исследований

Спектр поглощения необлученной пленки $\text{Ag}-\text{AgCl}$ (рис. 1, а, 1) представляет собой колоколообразную полосу с максимумом при 560 нм . Положение максимума хорошо согласуется с расчетной величиной 570 нм , полученной для мельчайших сферических гранул Ag в AgCl (показатель преломления $n = 2.08$) с учетом взаимодействия между гранулами [см. формулу (1)]. При облучении пленок $\text{Ag}-\text{AgCl}$ поляризованным светом полоса поглощения расщепляется на две компоненты и ослабляется. Полоса, соответствующая поляризации $\mathbf{E} \parallel \mathbf{E}_0$, сдвинута относительно полосы $\mathbf{E} \perp \mathbf{E}_0$ в сторону больших частот, обе полосы занимают коротковолновое положение относительно исходной. С увеличением времени экспозиции на начальных стадиях наблюдается быстрый сдвиг полос (рис. 2), причем полоса $\mathbf{E} \parallel \mathbf{E}_0$ сдвигается быстрее полосы $\mathbf{E} \perp \mathbf{E}_0$. Величина сдвига и расщепления насыщается при времени экспозиции $\sim 20 \text{ мин}$,

максимальное расщепление $\Delta\omega \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. После удаления AgCl в фиксаторе дихроизм в пленке Ag сохраняется (рис. 1, б). Полосы смещаются в коротковолновую часть спектра.

Оптические изменения в образцах, произошедшие в результате облучения, сопровождаются значительными структурными превращениями, что видно на микрофотографиях пленок Ag (рис. 3, а, б) до и после облучения. В исходной пленке Ag гранулы равномерно распределены по подложке. Средний диаметр гранул $\sim 200 \text{ \AA}$, среднее расстояние между ними $\sim 270 \text{ \AA}$, среднее число гранул ~ 1400 на 1 мкм^2 . Разброс гранул по размерам и взаимному расположению невелик. Крупные гранулы встречаются редко.

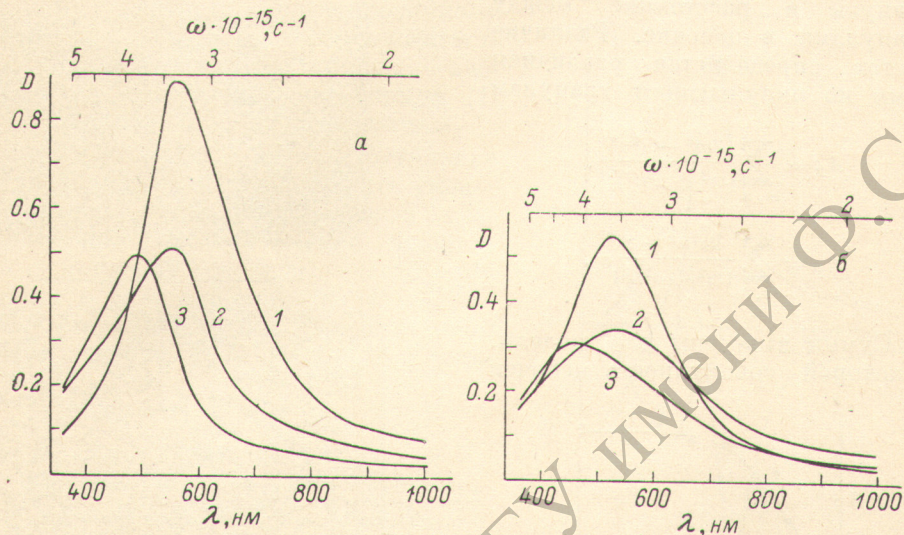


Рис. 1. Спектры поглощения пленки Ag—AgCl (а) и Ag (б), полученной из Ag—AgCl после фиксирования.

1 — до облучения; 2, 3 — после облучения линейно поляризованным светом; компоненты $E \perp E_0$ и $E \parallel E_0$ соответственно.

После облучения образуется пленка с заметным разбросом гранул по величине и взаимному расположению. На снимке видны цепочки, состоящие из тесно расположенных гранул и вытянутые главным образом в направлении, перпендикулярном E_0 (рис. 1, б). К цепочкам из крупных частиц примыкают цепочки из мелких. Между цепочками из крупных гранул наблюдаются цепочки из мельчайших гранул, диаметр которых ($50 \div 100 \text{ \AA}$) меньше среднего диаметра гранул в исходной пленке. Расстояние между цепочками из крупных гранул $\sim 500 \div 600 \text{ \AA}$. Хотя большинство цепочек вытянуто перпендикулярно E_0 , на снимке в небольшом числе встречаются цепочки, составляющие малые углы с E_0 . Некоторые цепочки разветвляются или испытывают излом. Отметим также значительное сокращение площади, занятой гранулярным серебром.

Обсуждение результатов

Как показано в [3, 4], фотоиндуцированный дихроизм в пленках Ag—AgI связан с образованием цепочек, состоящих из близко расположенных сферических гранул диаметром, значительно меньшим λ . Учет дипольного взаимодействия между гранулами цепочки приводит к расщеплению собственной частоты электронов в грануле на две компоненты ω_x и ω_y

$$\omega_{x,y} = \left[\omega_0^2 - \frac{\omega_p^2}{3\epsilon_0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 A_{x,y} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где ω_0 — собственная частота электронов в изолированной грануле, равная

$$\omega_0 = \frac{\omega_p}{(\epsilon_M + 2\epsilon_0)^{1/2}}, \quad (2)$$

$\omega_p = (4\pi Ne^2/m)^{1/2}$ — плазменная частота, равная $1.3 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$ для Ag, ϵ_0 — высокочастотная диэлектрическая постоянная диэлектрической среды, окружающей гранулы (для AgCl $\epsilon_0 = n^2 = 4.3$), ϵ_M — диэлектрическая постоянная, определяемая междузонными переходами в металле (4.1 для Ag), a_0 и a — радиус гранулы и расстояние между гранулами в цепочке. Различие частот определяется различием сумм по окружающим гранулам

$$A_x = \sum_{m,n} \frac{2m^2 - \alpha^2 n^2}{(m^2 + \alpha^2 n^2)^{3/2}},$$

$$A_y = \sum_{m,n} \frac{2\alpha^2 n^2 - m^2}{(m^2 + \alpha^2 n^2)^{3/2}}.$$

Суммы выведены для модели, в которой совокупность цепочек

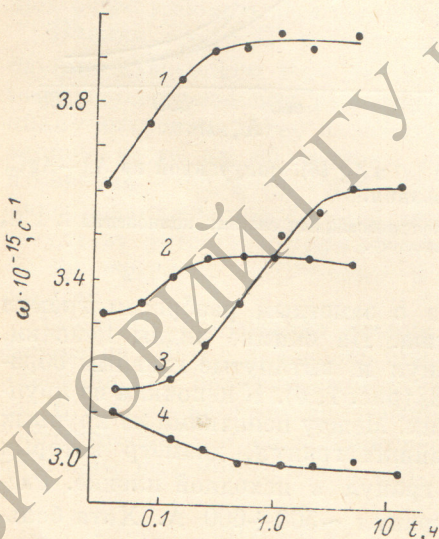


Рис. 2. Зависимости частот ω , соответствующих максимумам полос поглощения в дихроичных пленках Ag—AgCl и Ag—AgJ, от логарифма времени экспозиции t .

1, 2 — пленка Ag—AgCl, компоненты $E \parallel E_0$ и $E \perp E_0$ соответственно; 3, 4 — пленка Ag—AgJ, компоненты $E \perp E_0$ и $E \parallel E_0$ [4]; время экспозиции приведено в соответствие с экспозицией для пленок Ag—AgCl.

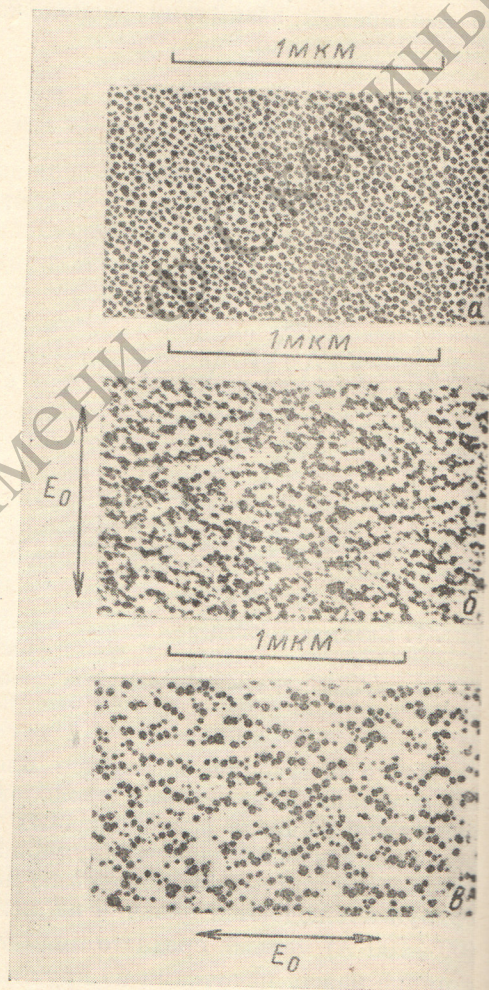


Рис. 3. Микрофотографии пленок Ag, полученных после фиксирования пленок Ag—AgHal.

a — пленка Ag после фиксирования необлученной пленки Ag—AgCl (соответствует спектру поглощения 1 на рис. 1, б); *b* — анизотропная пленка Ag после фиксирования облученной пленки Ag—AgCl (спектры 2, 3 на рис. 1, б). Цепочки из гранул Ag ориентированы перпендикулярно E_0 ; *b'* — анизотропная пленка Ag после фиксирования облученной пленки Ag—AgJ [3]. Цепочки из гранул Ag ориентированы вдоль E_0 .

представлена двумерной прямоугольной решеткой с параметрами a и b (b — расстояние между цепочками), целочисленные индексы m и n определяют положение узла в решетке. Анизотропию прямоугольной решетки определяет параметр $\alpha = b/a$. При $\alpha = 1$ решетка изотропна и величина $A = A_x =$

$= A_y$ определяет сдвиг частоты собственных колебаний электронов за счет взаимодействия гранул. При $\alpha > 1$ ($b > a$) $A_x > A > A_y$, т. е. возникает различие в собственных частотах для поляризаций $\mathbf{E}||X$ и $\mathbf{E}\perp X$ (ось X направлена вдоль цепочки); поляризации $\mathbf{E}||X$ соответствует низкочастотная, $\mathbf{E}\perp X$ — высокочастотная полоса по отношению к частоте ω_1 в изотропной решетке, т.е. $\omega_x < \omega_1 < \omega_y$. С ростом α разность частот $\omega_y - \omega_x$ растет и достигает насыщения [4], что соответствует случаю изолированной цепочки.

Результаты оптических измерений в Ag—AgCl хорошо соответствуют развитой теории. С ростом времени экспозиции наблюдается расщепление полос, причем низкочастотная компонента ($\mathbf{E}\perp\mathbf{E}_0$) соответствует электрическому вектору, ориентированному вдоль цепочки ($\mathbf{E}||X$), высокочастотная — ориентации $\mathbf{E}\perp X$. Однако наблюдается отступление от формул (1) и (2), поскольку в эксперименте $\omega_y > \omega_x > \omega_1$ (рис.2). Это отступление объясняется, если предположить уменьшение ε_0 среды, окружающей гранулы по мере облучения пленки, что приводит к высокочастотному сдвигу ω_0 и ω_1 , что видно из (1) и (2), и объясняет сдвиг полосы в необлученной пленке после удаления AgCl. Умень-

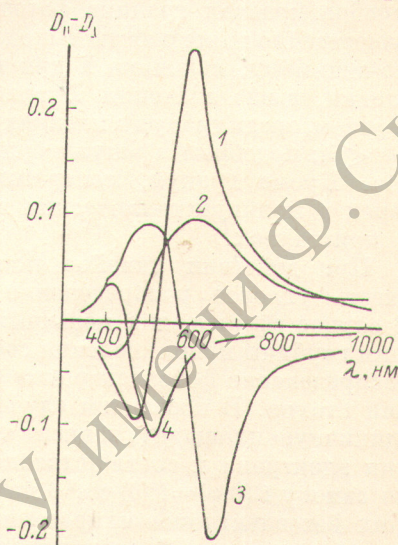


Рис. 4. Спектральные зависимости $D_{||}-D_{\perp}$.

1, 2 — дихроизм в пленке Ag—AgCl и в соответствующей ей пленке Ag, полученной после фиксирования; 3, 4 — дихроизм в пленке Ag—AgJ и в соответствующей ей пленке Ag, полученной после фиксирования [3].

шение ε_0 может быть связано с появлением в результате облучения большого количества гранул Ag на поверхности пленки AgCl, границах зерен и пересечении границ с поверхностью.

Интересно сравнить результаты исследования ЭВ в пленках Ag—AgCl и Ag—AgJ [3]. На рис.4 показаны спектральные зависимости разности $D_{||}-D_{\perp}$, характеризующие дихроизм образцов ($D_{||,\perp}$ — оптические плотности, соответствующие поляризациям $\mathbf{E}||\mathbf{E}_0$ и $\mathbf{E}\perp\mathbf{E}_0$). Видно, что дихроизм в пленках противоположного знака: если в Ag—AgCl длинноволновый максимум положителен, то в Ag—AgJ отрицателен. Удаление диэлектрика в обоих случаях не приводит к изменению знака дихроизма, а только к высокочастотному сдвигу кривых и ослаблению дихроизма. Знак дихроизма непосредственно связан с расположением цепочек из гранул Ag в пленках Ag—AgCl и Ag—AgJ, что видно из сравнения микрофотографий (рис. 3, б и в). В пленках Ag—AgJ цепочки преимущественно вытянуты вдоль \mathbf{E}_0 , что и определяет знак дихроизма в этом объекте. Таким образом, по взаимному расположению вектора поляризации облучающего света и образующихся в результате облучения цепочек следует различать поперечный и продольный эффект Вейгера.

Так как возникновение поперечного и продольного ЭВ сводится к взаимному расположению цепочек и вектора \mathbf{E}_0 , следует обсудить механизм фотоструктурных превращений, возникающих при облучении поляризованным светом. За основу при обсуждении возьмем гипотезу Мотта и Герни, успешно применяемую для объяснения многих фотографических эффектов [8, 9]. По этой гипотезе следует различать две стадии, протекающие при действии нефотоактивного света процессов: электронную и ионную. Быстропротекающая электронная стадия заключается в фотоэффекте на гранулах серебра с переходом электронов в зону проводимости

AgNaI и последующем захвате фотоэлектронов центрами прилипания с большой энергией активации. Для протекания фотоэффекта необходимо облучить вещество в области полосы поглощения гранулярного серебра и выполнить при этом условие

$$\hbar\omega > \chi, \quad (3)$$

где χ — работа выхода фотоэлектронов из гранулы. Так как гранулы в пленке различаются по размерам и по их положению, следует ожидать разброс величины χ . Различие в работе выхода для гранул разных диаметров определяется зависимостью электростатических сил притяжения и сил изображения от радиуса гранулы [10]. Величина χ существенно зависит от диэлектрического окружения. Для гранул Ag в галогенидах серебра красная граница фотоэффекта лежит при 1–1.5 эВ [9, 11], что существенно ниже работы выхода для чистой поверхности серебра (4.5 эВ). По-видимому, величина χ для гранул, расположенных на поверхности пленки, выше значения χ гранул, погруженных в диэлектрик. Таким образом, среди гранул в пленках Ag—AgNaI возможны такие, для которых $\hbar\omega < \chi$; подобные гранулы будут являться центрами стока фотоэлектронов. Кроме гранул, центрами прилипания могут служить границы зерен в поликристаллических пленках, дислокации и точечные дефекты в кристаллах.

При действии линейно поляризованного излучения следует также учесть угловое распределение фотоэлектронов, покидающих гранулу. В случае сферических мельчайших частиц диаметром, существенно меньшим глубины проникновения света в металл, следует ожидать, что угловое распределение фотоэлектронов близко к распределению при фотоионизации атомов. В последнем случае поток фотоэлектронов, пронизывающих единичную площадку, зависит от углов ϑ и φ между направлением движения электрона и соответственно вектором E_0 и волновым вектором света по закону $i(\vartheta, \varphi) = i_0 \cos^2 \vartheta \sin^2 \varphi$ [12]. Если так, то большинство вылетающих фотоэлектронов направлено вдоль E_0 в плоскости пленки в соответствии с геометрией эксперимента.

По различным оценкам, следующим из экспериментальных работ по сдвигу фотоэлектронов в импульсных электрических полях [13], длина свободного пробега фотоэлектрона в AgCl около 30–40 Å при комнатной температуре. Эта величина близка к среднему расстоянию между поверхностями соседних гранул в необлученной пленке (50–70 Å, рис. 3, а). Другими словами, фотоэлектроны могут захватываться соседними гранулами почти без рассеяния, что приводит к перераспределению заряда между соседними частицами, расположенными вдоль E_0 . Если перераспределение заряда произошло между идентичными гранулами, для которых справедливо условие (3), то возбужденное состояние быстро релаксирует за счет обратного туннелирования. Однако при захвате фотоэлектрона гранулой-ловушкой или другим центром прилипания возникает устойчивый во времени электростатический диполь с осью вдоль E_0 .

Нейтрализация диполя происходит за счет диссоциации положительно заряженной гранулы с выделением иона Ag^+ и последующем его перемещением по междоузлиям решетки AgNaI в сторону центра прилипания. Перемещение ионов Ag^+ определяет ионную, более медленную, стадию механизма Мотта и Герни. При длительном облучении процессы перезарядки и нейтрализации повторяются многократно, что способствует росту и накоплению частиц серебра в районе центра прилипания и их рассасыванию в более регулярных местах. В итоге возникает заметное перераспределение частиц по размерам и по поверхности подложки. Так как оси диполей расположены главным образом в направлении E_0 , движение ионов Ag^+ будет направленным, что приводит к анизотропии в распределении частиц Ag по поверхности пленки и в итоге к оптической анизотропии.

Обсудим возможные механизмы образования поперечного и продольного ЭВ. Наиболее вероятными центрами захвата фотоэлектронов в тонких

пленках являются границы зерен AgHal , стыки нескольких плоских границ и места пересечения границ с поверхностью. Это утверждение подкрепляется существованием на микрофотографиях облученных пленок изломанных цепочек и «вилок», состоящих из 3 или более прямолинейных цепочек. Такие образования видны в пленках $\text{Ag}-\text{AgJ}$ (рис. 3, в). Измерения показывают, что углы излома цепочек во многих случаях составляют 120° и 60° , что соответствует углам между боковыми гранями плоских монокристаллов AgJ . Цепочки как бы проявляют границы зерен AgHal . Эффект декорирования частицами серебра границ зерен и дислокаций в монокристаллах известен давно. Исследования [14] указывают на декорирование дислокаций в монокристаллах AgCl при их засвечивании даже при комнатной температуре. Декорирование ускоряется при возбуждении в кристаллах фотоэлектронов [15].

Предположение о том, что границы зерен являются основными центрами прилипания фотоэлектронов и последующего роста гранул Ag , хорошо

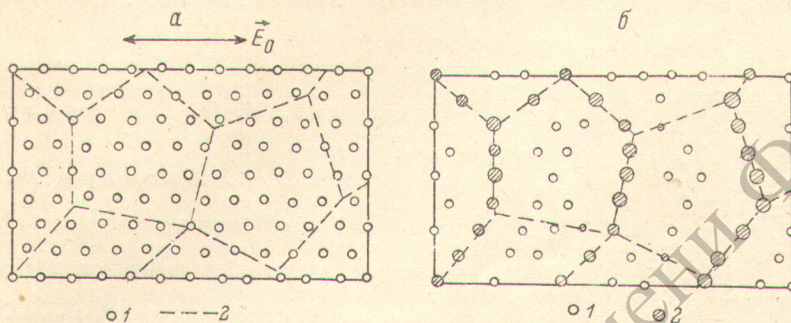


Рис. 5. Модель пленки $\text{Ag}-\text{AgCl}$ для объяснения поперечного ЭВ.

а — пленка до облучения; 1 — гранулы Ag , 2 — границы зерен AgCl . б — пленка после облучения линейно поляризованным светом с направлением колебаний E_0 ; 1 — гранулы Ag , оставшиеся на своих местах, 2 — гранулы, образовавшиеся при облучении на границах зерен AgCl за счет переноса ионов Ag^+ от соседних с границами гранул в направлении E_0 .

объясняет поперечный ЭВ. Направленный рост цепочек на границах поясняет рис. 5, на котором указаны границы зерен AgHal и равномерно распределенные по пленке гранулы. Допустим, что под действием света рассасываются соседние с границей гранулы в направлении E_0 . Легко видеть, что выделение крупных гранул будет происходить на границах, составляющих большие углы с E_0 . При больших размерах зерен по сравнению с расстоянием между гранулами, количество выделившегося серебра на единице длины прямолинейной границы пропорционально $\sin\theta$, где θ — угол между направлением границы и E_0 . Наряду с крупными гранулами, выделившимися на границах, образуются цепочки из оставшихся в глубине зерен мелких гранул, расположенные параллельно заполненным границам. Такая модель неплохо описывает взаимное расположение гранул на микрофотографии (рис. 3, б), соответствующей поперечному ЭВ в $\text{Ag}-\text{AgCl}$.

Природа продольного ЭВ, наблюдавшегося в $\text{Ag}-\text{AgJ}$, менее ясна. По-видимому, границы зерен в AgJ являются «плохими» центрами стока фотоэлектронов. В отличие от пленок $\text{Ag}-\text{AgCl}$ полоса $E \parallel E_0$ в пленках $\text{Ag}-\text{AgJ}$ по мере развития дихроизма смещается в сторону низких частот (рис. 2), что свидетельствует против выделения гранул серебра в местах пересечения границ зерен с поверхностью. По всей вероятности, центрами захвата фотоэлектронов с большой энергией активации являются места пересечения нескольких границ и случайные большие гранулы. В связи с этим число центров прилипания в пленках $\text{Ag}-\text{AgJ}$ значительно меньше, чем в $\text{Ag}-\text{AgCl}$, что приводит к заметному снижению скорости развития ЭВ в $\text{Ag}-\text{AgJ}$. Из рис. 2 видно, что насыщение ЭВ (по величине расщепления полос) в $\text{Ag}-\text{AgCl}$ достигается за время ~ 20 мин, в то время как для $\text{Ag}-\text{AgJ}$ соответствующее время ~ 4 ч. О небольшом числе центров захвата свидетельствует также небольшое число крупных гранул размером

более 500 \AA , случайно распределенных по подложке (рис. 3, в). Концентрация таких центров $\sim 30 \text{ мкм}^{-2}$. Редкие центры прилипания естественно будут поглощать большое число мелких гранул Ag, расположенных по обе стороны от ловушки в направлении E_0 . Таким образом, создаются протяженные области по пленке, свободные от частиц Ag и вытянутые вдоль E_0 . Эти области окаймляются цепочками из оставшихся мелких гранул Ag. Подобная модель груба и не объясняет некоторых деталей на снимках. Например, с этой точки зрения не ясно существование изломанных цепочек из мелких гранул Ag, явно проявляющих границы зерен AgJ и преимущественно вытянутых в направлении E_0 .

В заключение считаем приятным долгом выразить глубокую благодарность И. Н. Шкляревскому за обсуждение результатов эксперимента.

Литература

- [1] J. Eggert. В сб.: Междунар. конгресс по фотогр. науке, 1, Внешторгиздат, М., 1970.
- [2] F. Weigert. Ann. Phys., 63, 682, 1920.
- [3] Л. А. Агеев, В. К. Милославский, И. Н. Шкляревский. Опт. и спектр., 40, 1024, 1976.
- [4] Л. А. Агеев, В. К. Милославский, И. Н. Шкляревский. УФЖ, 21, 1681, 1977.
- [5] В. П. Черкашин. ФТТ, 14, 1261, 1972.
- [6] В. М. Безручко, В. И. Бодрягин, А. А. Шаталов. ФТТ, 12, 1092, 1970.
- [7] М. Е. Фонкич, В. П. Черкашин. В сб.: Междунар. конгресс по фотогр. науке, 110. Внешторгиздат, М., 1970.
- [8] П. В. Мейкляр. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. «Наука», М., 1972.
- [9] К. Миз, Т. Джеймс. Теория фотографического процесса, 165. «Химия», Л., 1973.
- [10] Г. А. Катрич, В. С. Самойлов. В сб.: Диспергированные металлические пленки, 319. Инст. физ. АН УССР, Киев, 1972.
- [11] Е. К. Пуцейко, П. В. Мейкляр. ЖЭТФ, 21, 341, 1951.
- [12] Д. И. Блохинцев. Основы квантовой механики, 407. «Наука», М., 1976.
- [13] J. R. Haynes, W. Shockley. Phys. Rev., 82, 935, 1951.
- [14] J. M. Hedges, J. W. Mitchell. Phil. Mag., 44, 223, 1953.
- [15] C. V. Childs, L. Slifkin. Phys. Rev. Lett., 3, 502, 1960.

Поступило в Редакцию 23 января 1978 г.