

НАНОРАЗМЕРНЫЕ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 544.653.23

ФЛИП-ФЛОП ЭФФЕКТ НА ПЛЕНКАХ АНОДИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

© 2021 г. В. В. Шелковников¹, *, Н. В. Васильева¹, С. В. Коротаев¹

¹ФБГУН Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева, 9, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: vice@nioch.nsc.ru

Поступила в редакцию 11.08.2020 г.

После доработки 18.08.2020 г.

Принята к публикации 25.08.2020 г.

Обнаружен Флип-Флоп эффект при анодировании оксида алюминия и последующем электрохимическом осаждении частиц Co/Ni. Измерены угловые зависимости спектров отражения металлизированных пленок анодированного оксида алюминия. Используя условия интерференции света в тонкой пленке, по снятым спектрам интерференционного отражения рассчитаны значения эффективного показателя преломления и толщины пленок от времени анодирования. На основе спектральных сдвигов и значений спектральных изменений в цветовых координатах системы $CIE L^*a^*b^*$ проведена количественная оценка Флип-Флоп эффекта. Показано, что эффективность Флип-Флоп эффекта зависит от природы кислоты (серной, фосфорной, хромовой) раствора анодирования. Показано, что наибольший Флип-Флоп эффект достигается при двойном анодировании в хромовой и фосфорной кислотах.

Ключевые слова: Флип-Флоп эффект, анодированный оксид алюминия, интерференционные спектры отражения, электрохимическое осаждение, показатель преломления

DOI: 10.31857/S0044185621020108

ВВЕДЕНИЕ

Электрохимическое анодирование алюминия – технологический процесс формирования прочного покрытия с варьируемым набором функциональных свойств. Анодированный оксид алюминия (АОА) способен окрашиваться в различные тона и цвета, как в ходе самого процесса анодирования, так и после него за счет явления интерференции света в тонкой пленке АОА. Интерференционное окрашивание алюминия происходит при электрохимическом осаждении металла в поры АОА определенной толщины [1–4]. При этом следует различать два явления. Электрохимически осажденные наночастицы меди или благородных металлов серебра и золота имеют аномальную дисперсию показателя преломления в области плазмонного резонанса, что может обуславливать появление максимумов в спектрах поглощения и отражения. Получению и исследованию свойств электрохимически осажденных наночастиц металла в АОА посвящен ряд работ [5–9]. Оптические свойства наночастиц благородных металлов в порах АОА в области плазмонного резонанса описаны в [10, 11]. Появление интерференционной окраски при отражении света от тонких слоев металлов на АОА проявляется

вне области плазмонного резонанса наночастиц и характерно не только для благородных металлов, но и для металлов, вообще не имеющих плазмонного резонанса в видимой области, Ni/Co в нашем случае.

Ранее был обнаружен эффект усиления интерференционного окрашивания АОА при двойном электрохимическом и химическом осаждении металлических наночастиц в поры АОА [12]. Вследствие интерференционной природы появления спектрально селективных провалов в спектрах отражения металлизированных пленок АОА следует ожидать проявления угловой зависимости изменения цвета пленок. Формирование различного цвета изображения или элемента при изменении углового поля зрения называется Флип-Флоп эффектом. Флип-Флоп эффект в металлизированных пленках имеет важное значение для создания оптических защитных от подделки и фальсификаций элементов с необычными цветовыми эффектами. Например, для получения Флип-Флоп эффекта специально создаются одномерные и двумерные плазмонные дифракционные решетки как защитные элементы, встраиваемые в дизайн защитной марки [13].

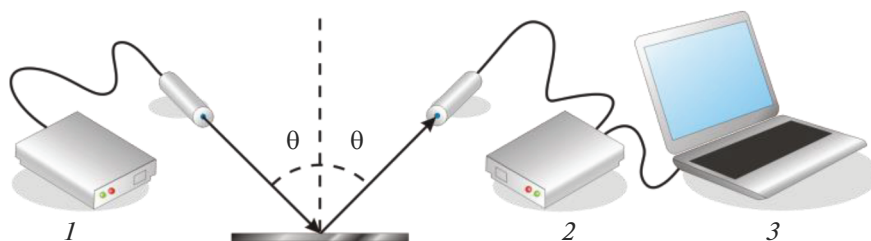


Рис. 1. Схема измерения спектров интерференционного отражения образцов анодированного алюминия. 1 – источник излучения Avantes AvaLightDHS, 2 – образец, 3 – спектрометр AvaSpec-1024. Диапазон углов измерения $\theta = 0^\circ - 80^\circ$.

При исследовании интерференционного окрашивания в образцах АОА, анодированных в определенных условиях в фосфорной, хромовой и серной кислотах при электрохимическом осаждении благородных металлов Ni/Co, нами обнаружен визуальный Флип-Флоп эффект, т.е. зависимость цвета слоя от угла наблюдения. Пластинки алюминия меняли цвет от пурпурного до зеленого в зависимости от угла падения света. Подобный эффект был получен в [14] при электрохимическом осаждении частиц серебра и золота на анодированную пленку оксида алюминия в шавелевой кислоте.

Актуальным является выявление условий процесса анодирования алюминия и характеристик анодного слоя, влияющих на возникновение Флип-Флоп эффекта в АОА.

Целью данной работы явилось выявление условий анодирования алюминия, влияющих на спектральные характеристики интерференционного отражения металлизированных пленок АОА и способствующих усилению Флип-Флоп эффекта.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для анодирования были взяты алюминиевые пластины толщиной 0,3 мм марки “ос. ч.” 99,95% Al, размером $20 \times 50 \text{ мм}^2$.

Подготовка

Очистка обезжириванием в 10% растворе NaOH и осветление в 10% растворе азотной кислоты.

Условия анодирования

Анодирование образцов осуществляли при температуре 20°C в: 2% растворе серной кислоты; 10% растворе ортофосфорной кислоты; 5% растворе хромовой кислоты при 293 К, $U_{\text{пост}} = 12 \text{ В}$ и плотности тока 2 А/дм^2 . В зависимости от электролита время анодирования варьировали от 2 до 75 мин. Отметим, что для фиксирования роста

анодной пленки при малых толщинах для анодирования использовался разбавленный раствор серной кислоты по сравнению со стандартными условиями анодирования (10–20% для серной кислоты).

Осаждение металлических частиц

Осаждение частиц никеля производили электрохимически током переменной полярности $I = 25 \text{ А}$; $U = 8 - 12 \text{ В}$. Состав электролита: сульфат никеля (50 г/л), сульфат кобальта (50 г/л), кислота борная (40 г/л), вода.

Измерения спектров отражения пленок в диапазоне длин волн 270–735 нм проводили спектрометром Avantes AvaSpec-1024 с разрешением 0,4 нм. Спектры интерференционного отражения (СИО) измеряли при разных углах падения света в диапазоне от 0° до 80° . Схема установки приведена на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Непосредственно после анодирования алюминиевая пластинка не имеет окраски. Интерференционная окраска появляется после электрохимического осаждения наночастиц металлов, Co/Ni на АОА. Длительность осаждения металла составляла порядка 30–60 с до формирования визуально наблюдаемого Флип-Флоп эффекта. Увеличение времени осаждения металла приводит к увеличению поглощения металлической фазы и исчезновению интерференционной картины с переходом в монокромный темный цвет. Вследствие осаждения металла на поверхности АОА интерференция между отраженным от алюминиевой подложки и падающим светом в анодированном слое усиливается. Спектр интерференционного отражения (СИО) зависит от угла измерения θ . Типичные зависимости СИО(θ) приведены на рис. 2. Как видно из приведенных рисунков, характер СИО и степень их смещения при изменении угла отражения зависит от времени анодирования и природы кислоты, в которой

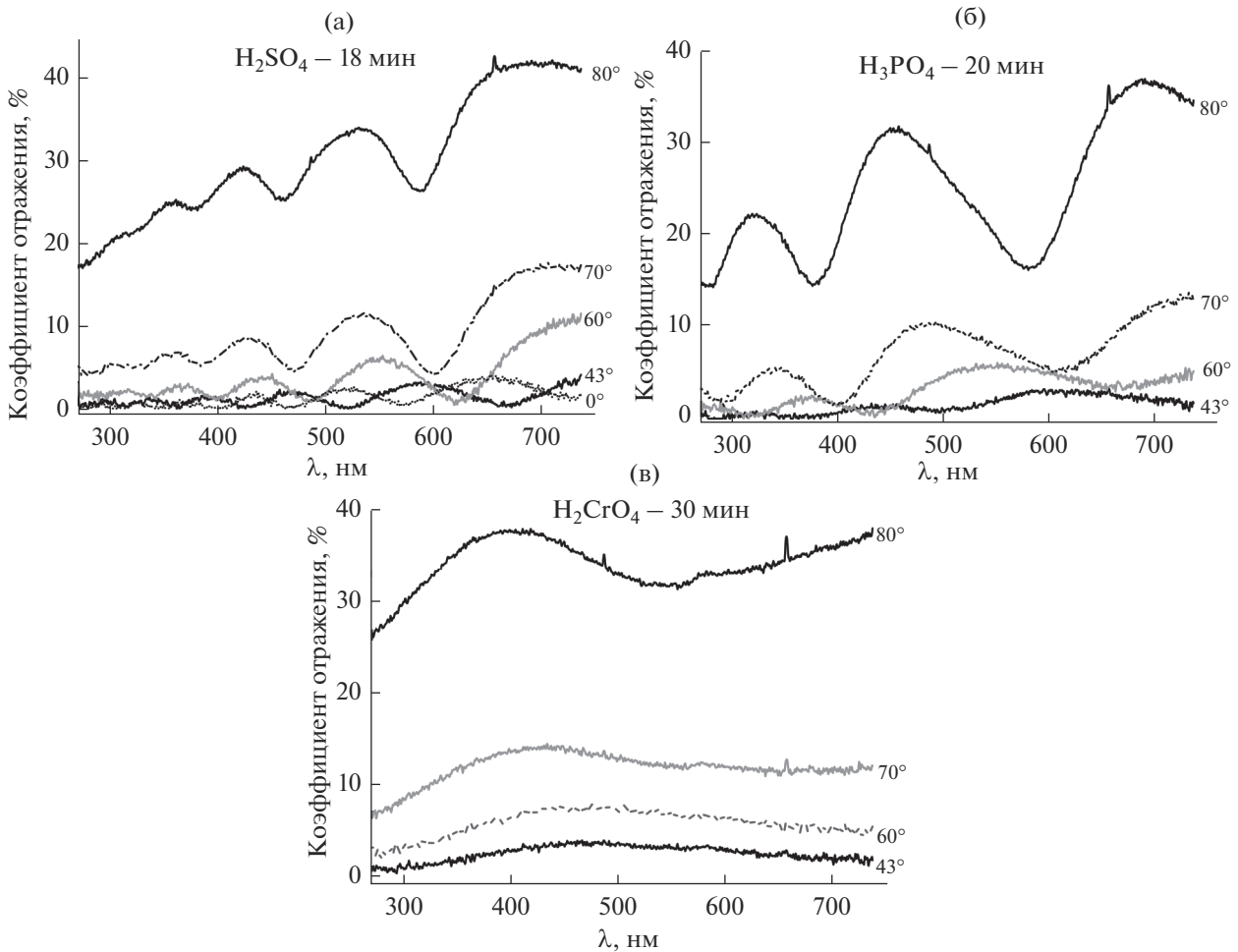


Рис. 2. Зависимость САО металлизированной пленки АОА от угла измерения: анодированной в H_2SO_4 18 мин (а), в H_3PO_4 20 мин (б) и в H_2CrO_4 30 мин (в).

происходит анодирование. При анодировании возможно изменение двух параметров пленки, влияющих на САО: толщины и показателя преломления. Толщину и показатель преломления пленки рассчитывали, используя условие интерференции в тонких пленках (1), (2) [14] по измеренной угловой зависимости спектров интерференционного отражения,

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = m\lambda, \quad (1)$$

$$\sin^2 \theta = n^2 - \frac{m^2 \lambda^2}{4d^2}, \quad (2)$$

где, d – толщина пленки, n – показатель преломления пленки, θ – угол падения излучения, m – номер интерференционного пика, λ – длина волны минимума в спектре отражения.

Представляя (2) в виде:

$$y = a + bx,$$

где $y = \sin^2 \theta$; $x = \lambda^2$,

получаем линейную зависимость, удобную для аппроксимации экспериментальных значений. Типичный результат аппроксимации методом наименьших квадратов (МНК) угловой дисперсии интерференционного минимума в координатах $(\lambda^2 - \sin^2 \theta)$ для вычисления значений n и d представлен на рис. 3.

Измеренные значения n и d для разного времени анодирования алюминия в кислотах H_2SO_4 , H_3PO_4 , H_2CrO_4 представлены на рис. 4а–4в.

Как видно из рисунков, во всех случаях наблюдается последовательный рост толщины пленки АОА с разными скоростями. Для наших условий анодирования в 2% H_2SO_4 и 10% H_3PO_4 скорости роста анодной пленки примерно одинаковы: 38 и 36 нм/мин. Минимальная скорость роста наблюдается в H_2CrO_4 – 9 нм/мин.

Начальное значение показателя преломления при формировании анодного слоя толщиной 0.2–0.4 мкм наибольшее в серной кислоте $n \approx 1.8$; в хромовой кислоте $n \approx 1.62$ и наименьшее значе-

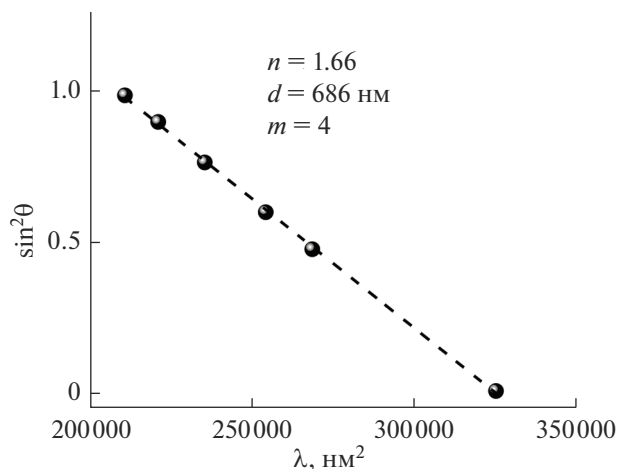


Рис. 3. Результат аппроксимации методом МНК сдвига СИО по уравнению (2) для пленки АОА, анодированной в серной кислоте 18 мин.

ние в фосфорной кислоте $n \approx 1.3$. В серной кислоте в начале анодирования формируется плотный барьерный слой окисла с высоким показателем преломления. Постепенно, по мере увеличения толщины пленки и появления пор, показатель преломления падает и при толщине порядка 1 мкм приближается к известному значению для анодированного в серной кислоте алюминия $n \approx 1.6$ [14]. Тенденция к уменьшению n по мере увеличения толщины пленки и развития порообразования проявляется при анодировании во всех исследованных кислотах. Наименьшие изменения n наблюдаются для H_2CrO_4 . Следует отметить, что спектры отражения образцов, анодированных в H_2CrO_4 менее 45 мин, не имели четко выраженных интерференционных максимумов и минимумов.

Для теоретической оценки изменения длины волны интерференционного пика как характеристики Флип-Флоп эффекта от параметров n и d для разных углов наблюдения использовали производную угловой зависимости спектрального сдвига. Максимальные спектральные сдвиги СИО следует ожидать в области максимума производной $\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}$, выражение (3) (для $m = 1$).

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \theta} = \frac{\partial \sqrt{4d^2(n^2 - \sin^2(\theta))}}{\partial \theta} = \frac{2d^2 \cos(\theta) \sin(\theta)}{\sqrt{d^2(n^2 - \sin^2(\theta))}} = \frac{d \sin(2\theta)}{\sqrt{(n^2 - \sin^2(\theta))}} \quad (3)$$

График этой функции для значений $n = 1.3; 1.5; 1.7$ и $d = 300$ нм приведен на рис. 5.

Из графика видно, что максимум функции для актуальных значений показателя преломления

находится в окрестности 50° и заведомо попадает при уровне 0.9 в диапазон углов 60° и 43° , выбранный для оценки спектрального сдвига. Поэтому, с практической точки зрения, для оценки величины сдвига достаточно измерить значения разницы длин волн ($\Delta\lambda$) при углах наблюдения 60° и 43° . В табл. 1 приведены значения $\Delta\lambda_{(43, 60)}$ при анодировании алюминия в ваннах трех использованных кислот.

Из анализа выражения (3) следует, что максимальное изменение длины волны при изменении угла наблюдения возрастает с ростом толщины и уменьшением показателя преломления слоя. Однако, при толщине анодного слоя более 600 нм количество интерференционных пиков СИО возрастает до 4-х и более, что затрудняет визуальное наблюдение однозначного цветового перехода. Кроме того, при увеличении толщины анодного слоя растет светорассеяние и интерференционный контраст падает. Поэтому, получение пленок АОА толщиной более 1 микрона затрудняет визуальное восприятие Флип-Флоп эффекта.

Возможность понижения показателя преломления АОА связана с увеличением объема пор, заполняемых воздухом, и зависит от природы кислоты, выбранной для анодирования. Как видно из рис. 4, минимальный полученный показатель преломления пористой пленки АОА равен $n = 1.3$ при анодировании в фосфорной кислоте, для которой характерен процесс растравливания пор [15, 16].

Оценку объемной доли пор P для АОА ($n_{12} = 1.3$), заполненных воздухом, осуществили, используя уравнение Лоренц–Лорентца и аддитивного вклада объемных рефракций композиционного материала, состоящего из двух фракций, по формуле (4).

$$\frac{n_{12}^2 - 1}{n_{12}^2 + 2} = \frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 + 2} P + \frac{n_2^2 - 1}{n_2^2 + 2} (1 - P). \quad (4)$$

При $n_1 = 1$ (воздух) и $n_2 = 1.63$ (оксид алюминия), исходя из данного соотношения, получим объемную фракцию пор $P = 50\%$. Уменьшение показателя преломления в АОА менее 1.3 возможно при высокой пористости анодной пленки $P \geq 50\%$. Однако, при пористости на уровне 70% и выше нарушается устойчивая связность структурных элементов пористого тела [17]. Таким образом, значение $n_{12} = 1.3$ АОА для пористости 50% при формировании АОА в фосфорной кислоте практически приводит к максимальному проявлению Флип-Флоп эффекта при одинарном анодировании.

В [14] в качестве количественной характеристики Флип-Флоп эффекта использовали величину FF , рассчитанную в цветовых координатах

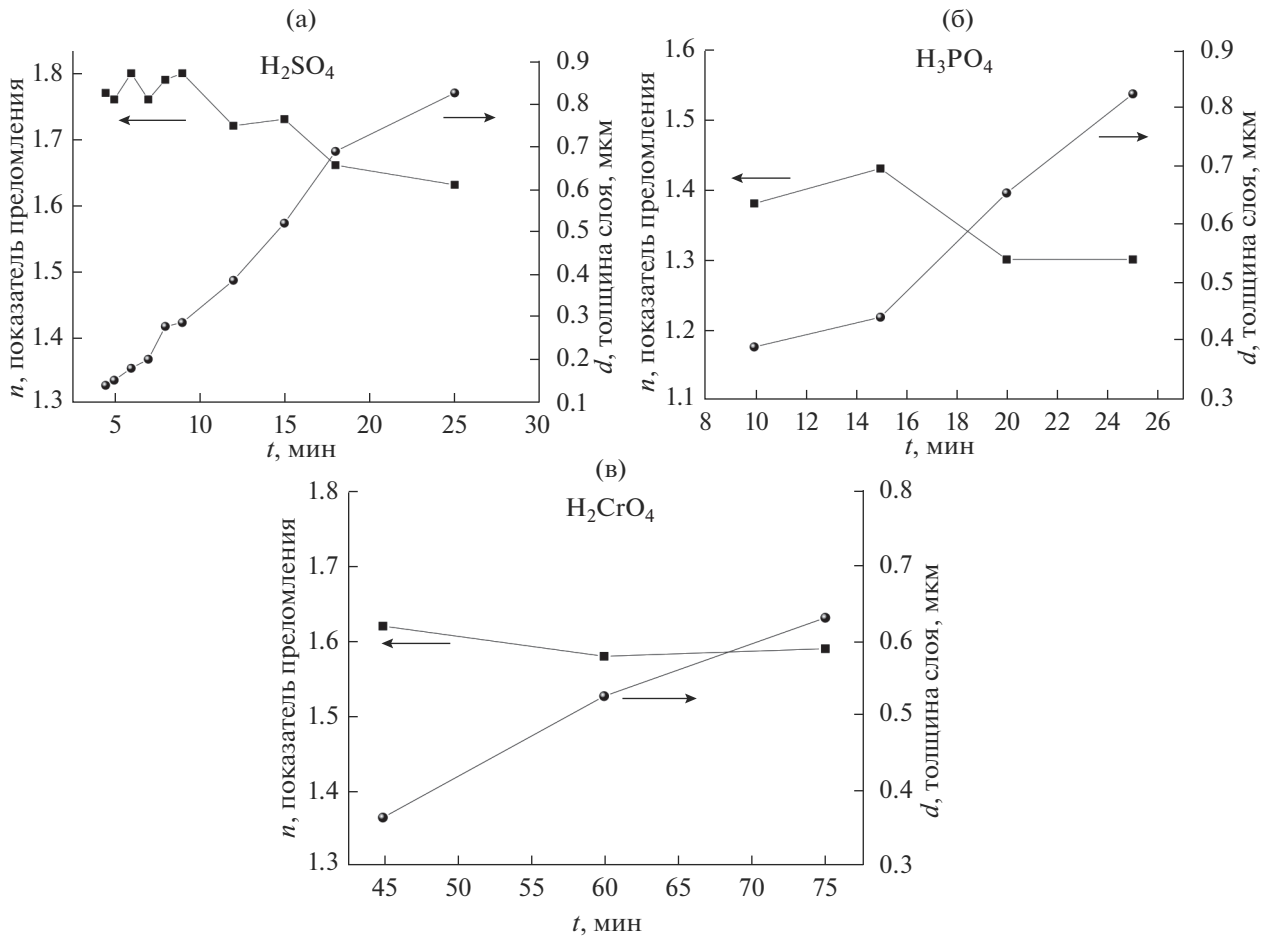


Рис. 4. Значения n и d для разного времени анодирования алюминия в: H_2SO_4 (а), H_3PO_4 (б), H_2CrO_4 (в).

a^* и b^* цветового пространства системы $CIE L^*a^*b^*$ для углов 0° – 60° , формула (5).

$$FF = \frac{\sqrt{(a_{60}^* - a_0^*)^2 - (b_{60}^* - b_0^*)^2}}{60^\circ}. \quad (5)$$

Для сопоставления с данными [14] величина FF была рассчитана аналогично для пленок, анодированных в разных кислотах с последующим осаждением наночастиц Co/Ni , табл. 1.

Также для количественной оценки эффекта, помимо изменения $\Delta\lambda_{(43, 60)}$ и значений параметра FF , были рассчитаны значения цветовых различий ΔE (см. выражение (6)) в диапазоне углов 43 и 60° в цветовом пространстве $CIE L^*a^*b^*$. В отличие от параметров $\Delta\lambda_{(43, 60)}$ или FF , величина цветового различия $\Delta E_{(43-60)}$, кроме спектрального сдвига, учитывает яркость цвета [18], что является важной дополнительной характеристикой Флип-Флоп эффекта.

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (6)$$

где ΔL^* , Δa^* , Δb^* разность цветовых координат первого и второго из сравниваемых цветов в цветовом пространстве $CIE L^*a^*b^*$, координата L несет информацию о яркости цвета.

Как видно из табл. 1, действительно, максимальные цветовые сдвиги $\Delta\lambda_{(43, 60)}$ при интерференционном Флип-Флоп эффекте наблюдали для образцов алюминия, анодированных в фосфорной кислоте. Однако, было выявлено, что применение анодирования последовательно в двух разных кислотах (хромовой и фосфорной) позволяет дополнительно увеличить спектральные сдвиги. Этот эффект был исследован при варьировании как времени обработки АОА в хромовой, так и фосфорной кислоте. Последовательное анодирование в хромовой и фосфорной кислотах приводит к увеличению значения $\Delta\lambda_{(43, 60)}$. Однако, при обратной последовательности анодирования, сначала в фосфорной, затем в хромовой кислотах, эффект не проявляется, и при углах менее 70° интерференционная картина практически не наблюдается. Также увеличение спектрального

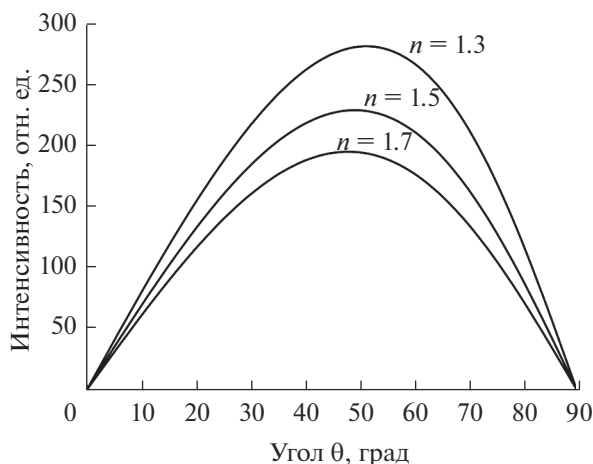


Рис. 5. График угловой дисперсии производной $\frac{d\lambda}{d\theta}$ для значений $n = 1.3; 1.5; 1.7$ и $d = 300$ нм.

сдвига не проявляется при двойном анодировании в серной и фосфорной кислотах.

Максимальное значение FF , достигнутое в [14], составило: 0.63 (для наночастиц серебра) и 0.41 (для наночастиц золота), осажденных на АОА, анодированном в щавелевой кислоте. Значения FF , представленные в табл. 1 для образцов АОА с наночастицами Co/Ni , находятся на уровне значений для образцов АОА с наночастицами благородных металлов, обладающими плазмонным резонансом, а для некоторых образцов их превышают. Полагаем, что для проявления Флип-Флоп эффекта с большими спектральными сдвигами осаждение металлических наночастиц играет вспомогательную роль. Определяющую роль играет процесс анодирования. Например, значение FF для образцов двойного анодирования и осаждения металлов Co/Ni в некоторых случаях достигает значений 0.9–1, что превышает эти значения при осаждении благородных металлов.

Видно, что на значения $\Delta E_{(43-60)}$ и $\Delta\lambda_{(43, 60)}$, рассчитанные для Флип-Флоп эффекта, влияет время анодирования. В среднем, по мере увеличения времени анодирования в фосфорной кислоте параметры $\Delta E_{(43-60)}$ и $\Delta\lambda_{(43, 60)}$ нарастают. Однако, явной зависимости этих значений от времени анодирования не наблюдается. Невыясненные факторы процесса анодирования влияют на разброс количественной оценки Флип-Флоп эффекта, хотя, в целом, из сопоставления параметров $\Delta E_{(43-60)}$ и $\Delta\lambda_{(43, 60)}$ очевидно, что двойное анодирование увеличивает спектральный сдвиг и яркость цветового перехода по сравнению с одинарным анодированием. Высокие значения $\Delta\lambda = 90-105$ нм могут использоваться при изготовлении сенсоров на основе АОА [21], а образцы с

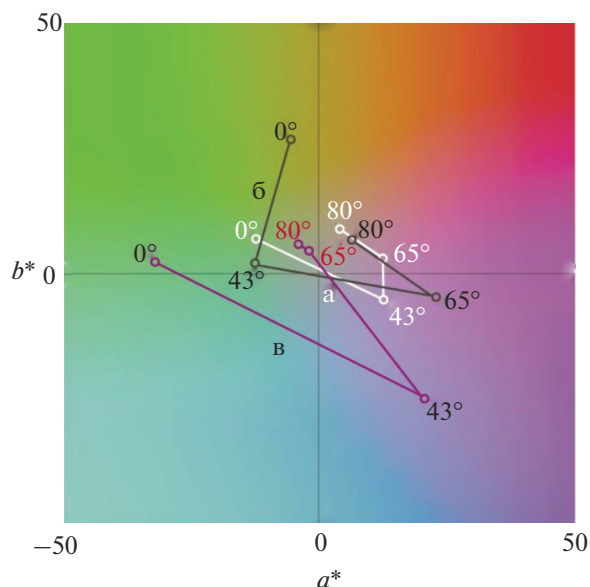


Рис. 6. Цветовая диаграмма, построенная в координатах a^*, b^* системы $CIE L^*a^*b^*$ для АОА, анодированного в H_2CrO_4 (45 мин) (а), в H_3PO_4 (15 мин) (б), H_2CrO_4 (15 мин)– H_3PO_4 (17 мин) (в).

высокими значениями ΔE могут быть интересны в области дизайна.

Дополнительную картину цветовых переходов дает цветовая диаграмма, построенная в координатах a^*, b^* системы $CIE L^*a^*b^*$, представленная на рис. 6, на которой также наблюдается увеличение цветовых изменений при двойном анодировании.

Влияние двойного анодирования на повышение эффективности Флип-Флоп эффекта, на наш взгляд, можно объяснить следующими особенностями формирования слоев АОА. Анодирование в хромовой кислоте приводит к образованию плотной малопористой пленки АОА с высокими коррозионными свойствами [19] и высоким по отношению к анодированию в фосфорной кислоте показателем преломления. Анодирование в фосфорной кислоте приводит к АОА с растравленными порами и низким показателем преломления. Поскольку при анодировании оксидный слой продвигается вглубь алюминиевой подложки, то анодный слой, образованный в хромовой кислоте, полностью в фосфорной кислоте не стравливается и находится сверху слоя АОА, формируемого в фосфорной кислоте. То есть, происходит формирование двухслойного покрытия, в котором показатель преломления верхнего слоя больше нижнего. Такое двухслойное покрытие обладает увеличенной отражающей способностью [20] по сравнению с однослойным покрытием при анодировании только в одной кислоте. Причем, как это и подтверждается на практике,

Таблица 1. Значения спектральных сдвигов и цветовых изменений от угла наблюдения для образцов АОА, анодированных в одиночных и в бинарных ваннах

Условия анодирования образца АОА	$\Delta\lambda_{(43, 60)}$	$FF_{(0-65)}$	$\Delta E_{(43-60)}$
H ₂ SO ₄ (4.5 мин)	29	0.39	18.3
H ₂ SO ₄ (8 мин)	21	0.49	17.7
H ₂ SO ₄ (15 мин)	30	0.43	16.6
H ₂ SO ₄ (25 мин)	42	0.11	19.6
H ₂ CrO ₄ (45 мин)	23	0.44	17.5
H ₂ CrO ₄ (60 мин)	39	0.12	20.2
H ₃ PO ₄ (10 мин)	51	0.58	29
H ₃ PO ₄ (15 мин)	66	0.85	41.2
H ₃ PO ₄ (20 мин)	70	0.49	42.3
H ₂ CrO ₄ (11 мин)–H ₃ PO ₄ (13 мин)	56	0.86	33.2
H ₂ CrO ₄ (11 мин)–H ₃ PO ₄ (15 мин)	73	0.61	16.7
H ₂ CrO ₄ (14 мин)–H ₃ PO ₄ (12 мин)	74	0.54	55.7
H ₂ CrO ₄ (14 мин)–H ₃ PO ₄ (14 мин)	60	0.57	39
H ₂ CrO ₄ (14 мин)–H ₃ PO ₄ (16 мин)	64	0.89	40
H ₂ CrO ₄ (14 мин)–H ₃ PO ₄ (18 мин)	76	0.89	39.2
H ₂ CrO ₄ (17 мин)–H ₃ PO ₄ (15 мин)	50	0.78	34.3
H ₂ CrO ₄ (17 мин)–H ₃ PO ₄ (17 мин)	61	1	41.2
H ₂ CrO ₄ (17 мин)–H ₃ PO ₄ (19 мин)	66	0.62	37.7
H ₂ CrO ₄ (17 мин)–H ₃ PO ₄ (22 мин)	54	0.79	26.4
H ₂ CrO ₄ (17 мин)–H ₃ PO ₄ (25 мин)	89	0.49	68.6
H ₂ CrO ₄ (20 мин)–H ₃ PO ₄ (12 мин)	54	0.71	21.2
H ₂ CrO ₄ (20 мин)–H ₃ PO ₄ (15 мин)	66	0.92	37.9
H ₂ CrO ₄ (20 мин)–H ₃ PO ₄ (20 мин)	59	0.61	23.9
H ₂ CrO ₄ (20 мин)–H ₃ PO ₄ (23 мин)	61	0.49	32.1
H ₂ CrO ₄ (20 мин)–H ₃ PO ₄ (26 мин)	74	0.37	52.3
H ₂ CrO ₄ (20 мин)–H ₃ PO ₄ (29 мин)	75	0.25	32.3
H ₂ CrO ₄ (25 мин)–H ₃ PO ₄ (16 мин)	63	0.85	40.2
H ₂ CrO ₄ (25 мин)–H ₃ PO ₄ (19 мин)	71	0.61	59.7
H ₂ CrO ₄ (25 мин)–H ₃ PO ₄ (22 мин)	106	0.41	35.9
H ₂ CrO ₄ (25 мин)–H ₃ PO ₄ (25 мин)	59	0.53	56
H ₂ CrO ₄ (25 мин)–H ₃ PO ₄ (31 мин)	91	0.44	35.8
H ₂ CrO ₄ (25 мин)–H ₃ PO ₄ (35 мин)	85	0.36	26.2

при перемене порядка анодирования: сначала в фосфорной, а затем в хромовой кислоте Флип-Флоп эффект исчезает, так как формируется слабоотражающая пленка, поскольку слой с низким показателем преломления является верхним, что соответствует формированию просветляющей пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования Флип-Флоп эффекта на АОА выявили характер изменения толщины и эффективных показателей преломления слоев пористого оксида алюминия от времени анодирования в различных кислотах

(серной, фосфорной, хромовой). На основе спектральных сдвигов и значений спектральных изменений в цветовых координатах системы $CIE L^*a^*b^*$ проведена количественная оценка Флип-Флоп эффекта. Выявлено, что наиболее ярко Флип-Флоп эффект проявляется при анодировании в фосфорной кислоте ($\Delta\lambda_{(43, 60)} = 66-70$ нм; $\Delta E_{(43-60)} = 42-43$) и, что двойное анодирование сначала в хромовой, а затем фосфорной кислоте приводит к усилению Флип-Флоп эффекта ($\Delta\lambda_{(43, 60)} = 85-106$ нм; $\Delta E_{(43-60)} = 55-68$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макшанчиков И.А.* Влияние толщины оксидной пленки и последующей ее окраски в органических красителях на отражающую способность // Депонированная рукопись № 929-B200805.12.2008
2. *Руднев В.С., Яровая Т.П., Недозоров П.М., Богута Д.Л.* Пат. RUS 2263164 10.08.2004.
3. *Стрельцов Е.А., Шукин Г.Л., Савенко В.П.* // Защита металлов. 1985. № 3. С. 457–469.
4. *Погребняк А.Д., Кыльщиканов М.К., Тюрин Ю.Н. и др.* // Журн. технической физики. 2012. Т. 82. № 6. С. 106–114.
5. *Атращенко А.В., Красилин А.А., Кучук И.С., Арысланова Е.М., Чивилихин С.А., Белов П.А.* // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. № 3(3). С. 31–51.
6. *Иванов Д.К., Иванова Ю.А., Стрельцов Е.А.* // Известия национальной академии наук Беларуси. 2012. № 2. С. 5–8.
7. *Nielsen K., Muller F., Li A. et al.* // Adv. Mater. 2000. V. 12. P. 582.
8. *Moon J., Wei A.* // Phys. Chem. B. 2005. V. 109. P. 23336.
9. *Xu D.S., Chen D.P., Xu Y.J. et al.* // Pure Appl. Chem. 2000. V. 72. P. 127.
10. *Sauer G., Brehm G., Schneider S. et al.* // Appl. Phys. 2005. V. 97. P. 024308.
11. *Горюх Г.Г., Мозалев А.М., Соловей Д.В., Сахарук В.Н.* // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы Междунар. Крымской конференции. 2006. Т. 2. С. 673.
12. *Шелковников В.В., Любас Г.А., Коротаев С.В.* // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2016. Т. 52. № 2. С. 160–164.
13. *Одинокоев С.Б., Жердев А.Ю., Лушников Д.С., Маркин В.В., Шишова М.В., Смирнов А.В., Акимов Б.В.* // Фотоника. 2017. № 5. С. 62.
14. *Yasui A., Kawahara T., Iwasaki M., Karuppuchamy S., Tada H., Ito S.* // Jpn. Soc. Colour Mater. 2006. V. 79(5). P. 190–196.
15. *Муратова Е.Н.* Искусственно и естественно упорядоченные микро- и наноразмерные капиллярные мембраны на основе анодного оксида алюминия: автореф. дис. канд. техн. наук. СПб, 2014. 16 с.
16. *Девяткина Т.И., Спаская М.М., Москвичев А.Н., Рогожин В.В., Михаленко М.Г.* // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 6(1). С. 109–114.
17. *Фандеев В.П., Самохина К.С.* // Интернет-журнал “Науковедение”. 2015. Т. 7. № 4.
18. *Горбунова Е.В., Чертов А.Н.* Типовые расчеты по колориметрии источников излучения. Учебное пособие. Университет ИТМО, СПб. 2014. 90 с.
19. *Бобрикова И.Г., Селиванов В.Н.* Технологии электрохимической и химической художественно-декоративной обработки металлов и их сплавов, Новочеркасск: ЮРГТУ. 2009. 107 с.
20. *Ершов А.В., Машин А.И.* Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электроннолучевого испарения. Учебно-методический материал “Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем”. Нижний Новгород, 2006. 99 с.
21. *Любас Г.А., Шелковников В.В., Коротаев С.В.* // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 1–2. С. 35–43.