

УДК 535.8

Использование RGB данных оптической светлопольной микроскопии для оперативного контроля чистоты поверхности активных элементов полупроводниковых пластин в производственном планарном цикле

© 2020 г. **А. А. Козырев***, **, канд. техн. наук; **М. В. Гордеева***;
Д. Н. Бурцев*; **Ю. А. Елисеева***

*ООО «НПП «Инжект», Саратов

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

E-mail: equilibriummm@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.02.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-06-76-88

Показано, что в производственном планарном цикле перспективно использование RGB данных оптической светлопольной микроскопии для оперативного контроля чистоты поверхности активных элементов полупроводниковых пластин. Продемонстрирована возможность определения толщины плёнки на поверхности подложки на основании RGB данных, полученных с помощью фотосенсора на основе матрицы Байера с известной спектральной характеристикой. Показан пример применения на полупроводниковой пластине GaAs с металлизированными активными золотыми элементами. Разработано программное обеспечение для поканального сравнения выделенной области двух снимков. Приведён алгоритм получения снимков на микроскопе для их последующего анализа и сравнения.

Ключевые слова: RGB, оптическая микроскопия, цифровая обработка изображений, тонкие плёнки, измерение толщины.

Код OCIS: 100.2000.

ВВЕДЕНИЕ

В производственном планарном цикле существует ряд последовательных операций с нанесением и последующим удалением покрытия с активной области полупроводниковой пластины, необходимых для формирования полупроводникового чипа. Как правило, это различные фоторезисты (PMMA [1]) и диэлектрики (SiO_2 [2], Al_2O_3 [3], SiN_x [3]). После проведения операций фотолитографии диэлектрик и фоторезист должны быть полностью удалены с рабочих элементов пластины. Для контроля чистоты поверхности могут использо-

ваться различные методы измерения толщины тонких плёнок: атомно-силовая микроскопия, профилометрия, спектрофотометрия, эллипсометрия и др. При этом, любой из этих методов подразумевает проведение отдельной операции технологического контроля, что с одной стороны увеличивает время производственного цикла, с другой — появляется вероятность возникновения брака из-за физических манипуляций с пластиной во время её транспортировки в измерительный прибор с последующей фиксацией в нём. Одним из методов, который может использоваться для контроля толщины тонких

плёнок является колориметрия или определение толщины плёнки по её цвету, предложенный И. Ньютоном [4]. Частным случаем колориметрии является анализ цветного изображения, полученного с помощью оптической светлопольной микроскопии с фотосенсором на основе матрицы Байера [5]. Этот метод используется для определения толщины как монослоёв графена [6,7] и тонких плёнок [8], так и биологических объектов без инвазивного вмешательства [9]. Преимуществом этого метода является то, что он может быть совмещён с другими операциями, проводимыми на микроскопе. Так, например, оптическая светлопольная микроскопия традиционно используется после проведения операций фотолитографии для контроля точности воспроизведения фотолитографического рисунка. Совмещение колориметрии с целью определения остатков наличия фоторезиста или диэлектрика в рабочих областях полупроводниковой пластины с операцией контроля геометрических размеров элементов позволяет уменьшить количество манипуляций с полупроводниковой пластиной и сократить время производственного цикла.

Целью работы является анализ RGB данных, полученных с помощью светлопольной оптической микроскопии с фотосенсором на основе матрицы Байера, и разработка методики, позволяющей на основании полученных RGB значений определять наличие и толщину тонких плёнок на исследуемых поверхностях.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЁНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА RGB ДАННЫХ

Метод Ньютона определения толщины плёнки по её цвету подразумевает наличие эталона с известной толщиной плёнки. При этом, материал плёнки и материал подложки у эталона и исследуемого образца должны быть одинаковыми. Колориметрия позволяет однозначно определить цвет образца и, зная оптические характеристики подложки и плёнки, рассчитать толщину последней.

RGB данные, полученные с фотосенсора, позволяют получить цвет образца и на осно-

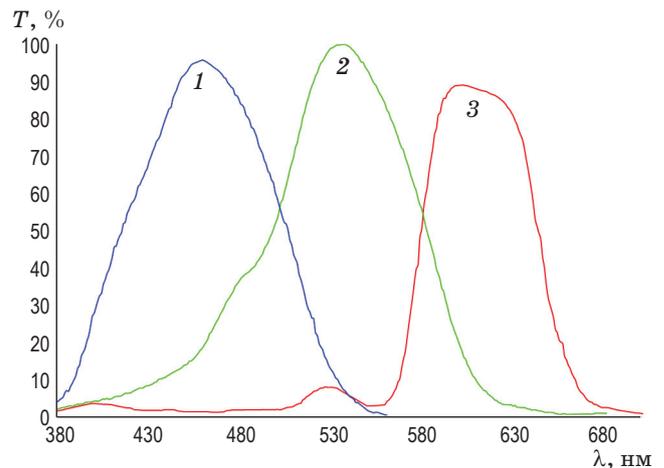


Рис. 1. Относительная спектральная чувствительность синего 1, зелёного 2 и красного 3 светофильтров камеры DP73 Olympus. За 100% принят максимум пропускания зелёного светофильтра.

ве этих данных рассчитать толщину плёнки. Однако, помимо цвета, RGB данные позволяют также узнать относительное снижение интенсивности сигнала в каждом канале.

Рассмотрим устройство матрицы Байера: фотосенсор состоит из пикселей, представляющих собой матрицу ПЗС (КМОП или др.), каждый из которых находится под светофильтром, имеющим свою спектральную характеристику пропускания $S_R(\lambda)$, $S_G(\lambda)$, $S_B(\lambda)$ (рис. 1). Фактически каждый светофильтр представляет собой полосу фильтра, имеющий довольно большую полуширину спектра, составляющую 60–100 нм. Матрица, состоящая из 4-х пикселей, один из которых находится под синим светофильтром, один под красным и два под зелёным, называется матрицей Байера [11].

Поскольку интенсивность отражения и пропускания системы подложка/плёнка при освещении монохроматическим светом является функцией толщины плёнки $T = f(d_l, \lambda)$, где d_l — толщина плёнки, λ — длина волны излучения, то с помощью фотосенсора и всего одного светофильтра можно, измеряя интенсивность пропускания или отражения от образца без плёнки, а затем от образца с плёнкой, рассчитать фазовую толщину плёнки $4\pi n_l d_l / \lambda$ с периодом $2\pi k$, где k — целое число, используя формулу (1) [12],

$$R = \frac{(n_s - n_a)^2 \cos^2(4\pi n_l d_l / \lambda) + i[(n_s n_a / n_l) - n_l]^2 \sin^2(4\pi n_l d_l / \lambda)}{(n_s + n_a)^2 \cos^2(4\pi n_l d_l / \lambda) + i[(n_s n_a / n_l) + n_l]^2 \sin^2(4\pi n_l d_l / \lambda)}, \quad (1)$$

где n_s — показатель преломления подложки, n_l — показатель преломления плёнки, n_a — показатель преломления среды. На этом принципе работает одноволновая система оптического контроля, с той лишь разницей, что ширина полосового фильтра составляет единицы нанометров, а период известен заранее, так как рост плёнки начинается с нуля.

Используя ещё один светофильтр, можно найти, какому периоду принадлежит фазовая толщина, и найти оптическую толщину плёнки $n_l d_l$. Если же показатель преломления плёнки n_l известен, то можно рассчитать её физическую толщину. Таким образом, двух светофильтров достаточно для расчёта толщины, а наличие третьего светофильтра повышает точность измерений.

Интенсивность сигнала в каждом канале RGB изображения лежит в диапазоне от 0 до 255 единиц и определяется спектром источника излучения $E(\lambda)$, спектром чувствительности светофильтров $S_{RGB}(\lambda)$, спектром отражения образца $R(\lambda)$ и временем экспозиции t и может быть записана в следующем виде (2) [8]:

$$I_{RGB} = t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{RGB}(\lambda) R(\lambda) E(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где I_{RGB} — измеренное значение R, G и B, λ_1 и λ_2 — начало и конец исследуемого спектрального диапазона, совпадает с областью интегральной чувствительности трёх R-, G-, B-фильтров.

Пусть I_{sRGB} — измеренное значение RGB образца без плёнки, I_{lRGB} — измеренное значение RGB образца с плёнкой. Отношение этих значений dI_{RGB} можно записать в виде

$$\frac{I_{sRGB}}{I_{lRGB}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{RGB}(\lambda) R_s(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{RGB}(\lambda) R_l(\lambda) E(\lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

Если ввести коэффициент усиления и умножить на него интеграл в правой части уравнения так, чтобы значения во всех каналах стали одинаковыми, то есть $I_{sR} = I_{sB} = I_{sG}$, то спектр излучения источника $E(\lambda)$ будет скомпенсирован таким образом, что его за-

висимостью от длины волны можно пренебречь

$$\begin{aligned} \frac{I_{sR}}{I_{lR}} &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R(\lambda) R_s(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R(\lambda) R_l(\lambda) E(\lambda) d\lambda} = \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R(\lambda) R_s(\lambda) k E d\lambda}{t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R(\lambda) R_l(\lambda) k E d\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R(\lambda) R_s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R(\lambda) R_l(\lambda) d\lambda}. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогично будут выглядеть отношения для G- и B-каналов. Таким образом, выражение (3) принимает вид

$$dI_{RGB} = \frac{I_{sRGB}}{I_{lRGB}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{RGB}(\lambda) R_s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{RGB}(\lambda) R_l(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

при условии, что время экспозиции образца без плёнки t равно времени экспозиции образца с плёнкой, а $I_{sR} = I_{sB} = I_{sG}$. На практике равенство этих значений обеспечивается установкой баланса белого не по нейтральному серому образцу (значение коэффициента отражения которого не зависит от длины волны в видимом диапазоне), а непосредственно по измеряемому образцу. В случае, если в качестве образца выступает поверхность золота, то баланс белого устанавливается по цвету золота, то есть коэффициенты усиления подбираются так, чтобы значения во всех трёх каналах RGB стали одинаковыми. Цифровое изображение образца при этом примет нейтральный серый цвет, поскольку насыщенность определяется разностью значений самого яркого и самого тусклого канала, которая при равенстве значений R, G и B будет равна нулю.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В планарном цикле чаще всего используются полупроводниковые пластины из кремния и арсенида галлия с металлизацией из золота,

поэтому в качестве материалов для исследования были выбраны арсенид галлия и золото. Образцы с золотой плёнкой на стеклянных подложках из стекла марки К8 в количестве 7 шт. были получены с помощью термического испарения в вакууме. В качестве адгезионного подслоя использовался титан, нанесённый с помощью магнетронного распыления. Толщина золота определялась гравиметрическим методом с помощью подготовки навески заданной массы с её последующим полным испарением. Контроль толщины плёнки золота с титаном осуществлялся с помощью измерения высоты на границе плёнка/подложка с помощью лазерной конфокальной микроскопии на микроскопе LEXT OLS4100. Полученный профиль поверхности представлен на рис. 2, из которого видно, что суммарная толщина покрытия составила 0,23 мкм, толщина титана в этом покрытии равна 0,01 мкм (она определялась по скорости напыления). Таким образом, толщина золота на образцах составила 220 нм, что превышает необходимые 200 нм, после которых плёнка золота обладает оптическими характеристиками объёмного материала [10]. В качестве полупроводниковых подложек использовались химически очищенные пластины *p*-типа арсенида галлия, легированного цинком с ориентацией [100].

На поверхность золота и арсенида галлия была нанесена плёнка оксида кремния методом ионного распыления в вакууме. В качестве мишени использовался чистый кремний,

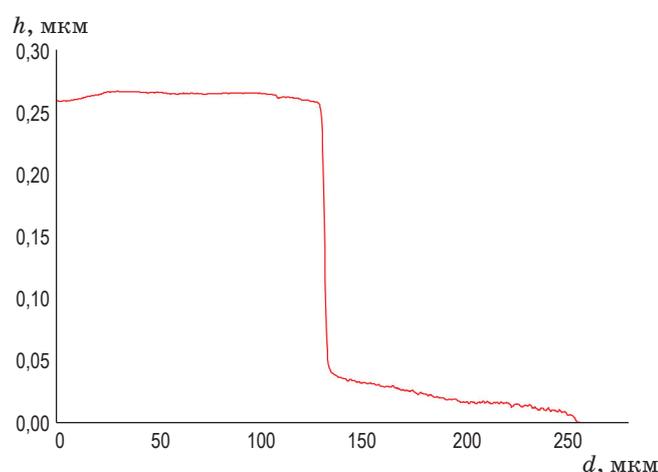


Рис. 2. Профиль подложки с нанесённой на неё плёнкой золота, измеренный методом лазерной конфокальной микроскопии.

который распылялся ионами аргона. Для окисления осаждённого кремния в объём камеры подавался кислород. Толщины плёнок SiO₂ на подложках составили 4, 12, 24, 36, 48 и 72 нм и определялись по времени напыления. Для расчёта зависимости спектров отражения образцов от толщины покрытия были измерены спектральные характеристики

Расчитанные значения n и k на основании измеренных спектров пропускания и отражения под углом 8° плёнки золота, толщиной 20 нм, полученной методом резистивного испарения на подложке из стекла К8 толщиной 0,17 мм без адгезионного подслоя

λ , нм	T , %	R , %	n	k
400	22,328	34,368	1,8639	2,0099
410	23,057	33,916	1,8390	2,0167
420	23,984	33,294	1,8071	2,0171
430	25,067	32,598	1,7687	2,0128
440	26,37	31,756	1,7185	2,0002
450	27,96	30,763	1,6559	1,9812
460	29,893	29,643	1,5745	1,9564
470	32,352	28,402	1,4653	1,9285
480	35,369	27,217	1,3197	1,9073
490	38,618	26,644	1,1334	1,9139
500	41,401	27,339	0,9190	1,9933
510	42,877	29,463	0,7457	2,1324
520	43,131	32,413	0,6159	2,2920
530	42,585	35,762	0,5204	2,4548
540	41,593	39,149	0,4495	2,6119
550	40,325	42,469	0,3957	2,7610
560	38,91	45,675	0,3524	2,9050
570	37,418	48,715	0,3185	3,0425
580	35,931	51,575	0,2906	3,1736
590	34,414	54,263	0,2668	3,3019
600	32,95	56,779	0,2465	3,4263
610	31,54	59,109	0,2289	3,5472
620	30,147	61,306	0,2135	3,6663
630	28,844	63,346	0,2002	3,7827
640	27,601	65,21	0,1890	3,8953
650	26,396	66,959	0,1789	4,0076
660	25,24	68,61	0,1705	4,1186
670	24,147	70,105	0,1638	4,2281
680	23,097	71,488	0,1588	4,3365
690	22,079	72,773	0,1555	4,4444
700	21,141	73,91	0,1543	4,5487

подложек и подложек с осаждёнными на них плёнками на спектрофотометре PhotonRT, после чего произведён расчёт дисперсии показателя преломления и коэффициента экстинкции с помощью матричного метода. Также, для нахождения комплексного показателя преломления золотой плёнки, было произведено напыление золота толщиной 20 нм на подложку из стекла К8 без использования адгезионного подслоя. Полученные значения дисперсии n и k , рассчитанные из измеренных спектров пропускания и отражения приведены в таблице.

RGB снимки образцов были получены с помощью камер DP73, установленных на микроскопы Olympus VX51M и MX61, оборудованными объективами с увеличением $5\times$, $10\times$, $20\times$, $50\times$ и $100\times$. Съёмка осуществлялась в режиме светлого поля (образец освещается сверху так, что падающий луч света имеет минимальный угол к нормали поверхности образца).

Для проведения операции контроля чистоты поверхности использовалась пластина GaAs, размером 3". На поверхность пластины был нанесён слой золота толщиной 220 нм с адгезионным подслоем титана толщиной 0,01 мкм. С помощью контактной фотолитографии и последующего химического травления слоёв золота и титана на пластине были сформированы металлизированные площадки размером 300×350 мкм.

На полученную поверхность методом центрифугирования был нанесён фоторезист марки ФП-9120-2,0. Для измерения толщины слоя фоторезиста с помощью инструмента для скалывания от пластины была отколота полоска шириной 3 мм. Полоска была помещена сколом вверх на предметный столик микроскопа Olympus

VX51M и далее были проведены замеры толщины слоя фоторезиста в трёх точках на сколе пластины с использованием объектива $100\times$. Толщина фоторезиста составила 1,8–1,9 мкм.

Сушка нанесённого на пластине фоторезиста проводилась в 2 этапа: предварительная сушка с целью удаления растворителя из плёнки; задубливание с целью дальнейшей стабилизации и повышения химической стойкости плёнки фоторезиста. Полученное изображение пластины с фоторезистом приведено на рис. 3.

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ RGB ДАННЫХ

Спектральные характеристики образцов были измерены в режиме отражения под углом 8 градусов к нормали. При расчёте толщины режим считался нормальным, и влияние угла отклонения от нормали на спектр отражения не учитывалось. Полученные спектральные характеристики приведены на рис. 4.

Как видно из графиков рис. 4, осаждение плёнки с низким показателем преломления по-разному влияет на относительное изменение спектра отражения. Так, на золоте плёнка оксида кремния толщиной 4 нм приводит к значительному (на 4%) изменению отражательной способности в синей области спектра (400–500 нм), незначительному в зелёной (на 1,4%) и практически отсутствующему в красной. На арсениде галлия осаждение плёнки оксида кремния толщиной 4 нм приводит к относительно равномерному снижению отражательной способности во всей видимой области спектра.

Для того, чтобы оценить, как толщина плёнки d_i будет влиять на относительное изменение значений в R-, G- и B-каналах, с помощью матричного метода была рассчитана зависимость спектра отражения от толщины плёнки для подложки из золота и арсенида галлия $R(d, \lambda)$, которая затем была умножена на известную спектральную чувствительность светофильтров $S_{RGB}(\lambda)$ матрицы Байера фотосенсора камеры DP73 Olympus (рис. 1) по формуле (2). Полученная зависимость dI_{RGB} от толщины оксида кремния на образцах приведена на рис. 5. На нём же отмечены точками экспериментально измеренные относительные изменения значений R, G и B.

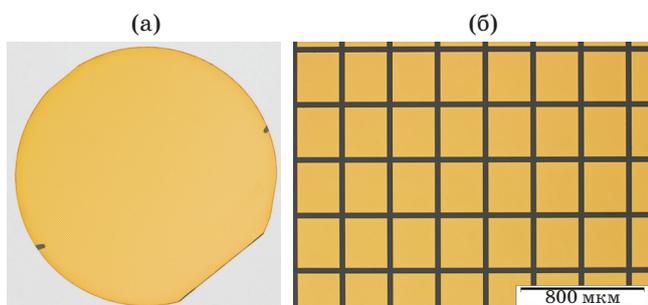


Рис. 3. Полупроводниковая пластина GaAs с изготовленными на ней золотыми площадками. (а) — внешний вид пластины, (б) — $5\times$ оптическое увеличение.

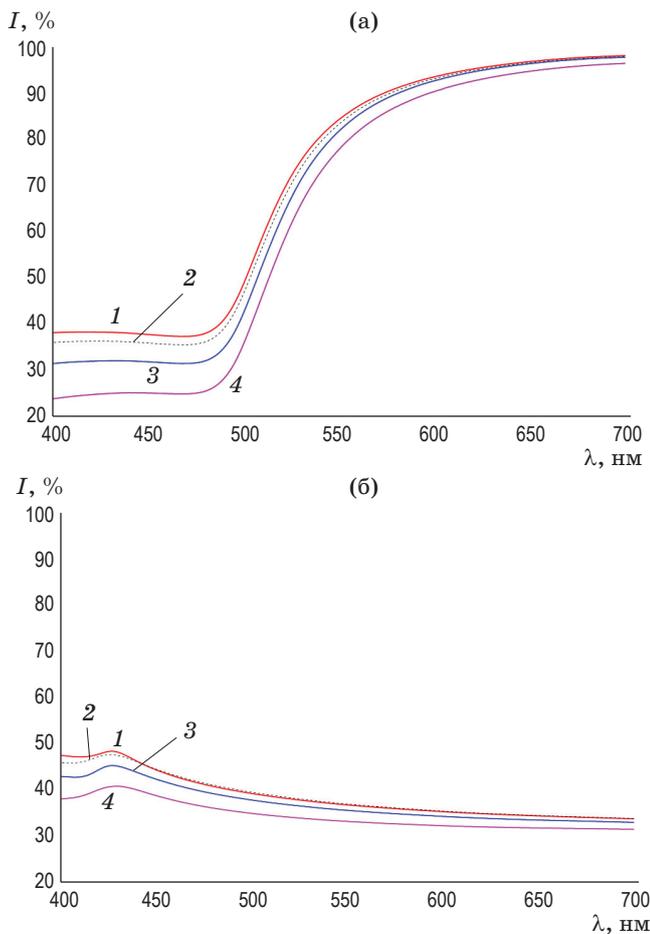


Рис. 4. Спектры отражения образцов. (а) золота, (б) арсенида галлия. 1 — чистый образец, 2 — образец с плёнкой SiO_2 толщиной 4 нм, 3 — образец с плёнкой SiO_2 толщиной 12 нм, 4 — образец с плёнкой SiO_2 толщиной 24 нм.

Для экспериментального определения изменения значений R , G и B использовались два микроскопа, оборудованных камерой DP73. Наблюдение проводилось в отражённом свете в режиме светлого поля с помощью объектива с увеличением $5\times$. С помощью программного обеспечения к камере все нелинейные коррекции изображения были приведены к линейным, а именно гамма-коррекция и резкость установлена равной 1, контраст — 0.

Образец без покрытия был установлен на столик микроскопа, яркость источника освещения была установлена на максимум, после чего произведена выдержка в течение 5 минут для прогрева лампы и стабилизации температуры оптической системы. Затем была произведена фокусировка и установка баланса белого по поверхности образца. Коэффициенты

усиления каналов в случае установки баланса белого по поверхности золотого образца составили $R = 0,7$, $G = 1$, $B = 2,2$. В случае установки по поверхности образца арсенида галлия $R = 0,9$, $G = 1$, $B = 1,2$. Как видно на рис. 5, яркость на образце с плёнкой во всех каналах будет ниже, чем на чистом образце, поэтому экспозиция была установлена и зафиксирована так, чтобы яркость во всех каналах была максимально возможной, но при этом не было перенасыщения, то есть значения в каналах не достигали 255. После создания снимка на столик поочередно устанавливался образец с плёнкой с известной толщиной и производилась его съёмка в тех же самых условиях, что и съёмка образца без покрытия. Сохранение снимка осуществлялось в формате jpeg без сжатия в расширенном цветовом пространстве Adobe RGB.

Для того, чтобы получить среднее значение R , G и B по всей поверхности изображения, было найдено отношение сумм всех значений R , G и B снимка к количеству пикселей. Отношение средних значений R , G и B образцов с плёнкой к среднему значению R , G и B образца без плёнки приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 5а, из-за того, что кривая B имеет больший угол наклона по сравнению с кривыми G и R , значения в синем канале будут в большей степени отклоняться при наличии тонкой плёнки. При этом, при увеличении показателя преломления степень кривизны наклона будет возрастать, поэтому плёнки с большим n будут иметь меньший порог обнаружения. Так, как видно из рис. 5а, плёнка SiO_2 с показателем преломления 1,5 и толщиной 4 нм на подложке золота вызывает изменение со 100% до 96% в синем канале и до 98,6% в зелёном. Плёнка с показателем преломления 1,65 приведёт к такому же изменению значений в каналах при толщине 3 нм.

Для оценки доверительного интервала было проведено 40 измерений значений RGB эталонного образца стекла К8, покрытого золотом, и пластины арсенида галлия с золотыми площадками (рис. 3), после чего найдено отношение значений dI_{RGB} для каждой пары измерений. Доверительный интервал с доверительной вероятностью 99% составил 1,5%. Отклонение в синем канале на величину 1,5% в случае золотой подложки, покрытой оксидом кремния, и спектральной чувствительности фильтров матрицы Байера, изображённых на рис. 1, соответствует

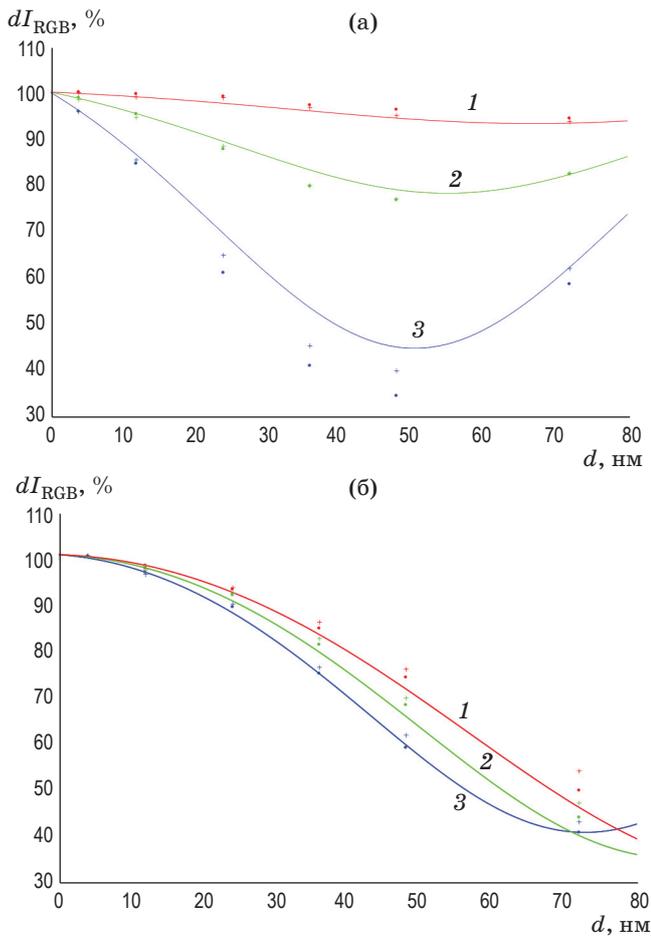


Рис. 5. Зависимость относительного изменения значений в каналах. 1 — В, 2 — G, 3 — R от толщины плёнки оксида кремния на подложке из золота (а), арсенида галлия (б). Точками отмечены данные измерений с микроскопа Olympus BX51M, перекрестиями — Olympus MX61.

толщине плёнки 2 нм. Поскольку SiO₂ — это материал, обладающий одним из самых низких показателей преломления, — то можно утверждать, что с помощью анализа RGB данных снимков, полученных с помощью оптической микроскопии, можно обнаруживать на подложке из золота плёнки толщиной не менее 2 нм.

ОСОБЕННОСТИ СРАВНЕНИЯ RGB СНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Область наблюдения в светлопольной оптической микроскопии освещается светом, поступающим непосредственно на образец через объектив. Соответственно, поле засветки име-

ет неоднородности, связанные с aberrациями оптической системы микроскопа, поэтому какие-то области могут быть освещены сильнее или слабее, какие-то иметь цветовой оттенок вследствие хроматических aberrаций. Подстройка освещённости апертурной диафрагмой позволяет повысить однородность засветки, однако получение высокой равномерности яркости на большой площади образца является сложно реализуемой задачей. На рис. 6 приведено распределение яркости в одном из каналов изображения образца чистого золота, полученного при съёмке через объектив с увеличением 5[×], 20[×], 50[×] и 100[×].

Как видно из рис. 6, объективы с небольшим увеличением до 20[×] обладают примерно одинаковым распределением яркости по площади образца. Среднеквадратичное отклонение значений в синем канале по полю изображения размером 1600×1200 пикселей для объектива 5[×] составило $\sigma = 8,5$, для объектива 20[×] — $\sigma = 9,6$. Объективы с большим увеличением имеют сильно отличающееся распределение яркости с одной стороны (среднеквадратичное отклонение для объектива 50[×] составило $\sigma = 11,2$, для объектива 100[×] — $\sigma = 16,5$) и большую разницу между минимальным и максимальным значением яркости с другой стороны, причём, чем больше увеличение, тем больше будет градиент значений в R-, G- и B-каналах. Связано это в первую очередь с тем, что при больших увеличениях глубина резко изображаемого пространства не превышает одного микрона, и если образец не идеально плоский, часть его площади будет находиться выше плоскости фокусировки, часть — ниже, и иметь, соответственно, меньшую яркость. Таким образом, для получения снимков с целью последующего анализа их RGB данных целесообразнее использовать объектив с минимальным увеличением, которое допустимо для разрешения исследуемой области.

Как видно из рис. 6а, даже при минимальном увеличении объектива, равным 5[×], яркость оптически однородного образца меняется от 190 до 250 единиц в одном канале. Если сравнивать два изображения (эталона без плёнки и образца с плёнкой), то при усреднении по всему изображению неравномерность засветки не окажет никакого влияния, так как на обоих образцах она будет одинаковой. Однако в производственном планарном цикле необходимо контролировать

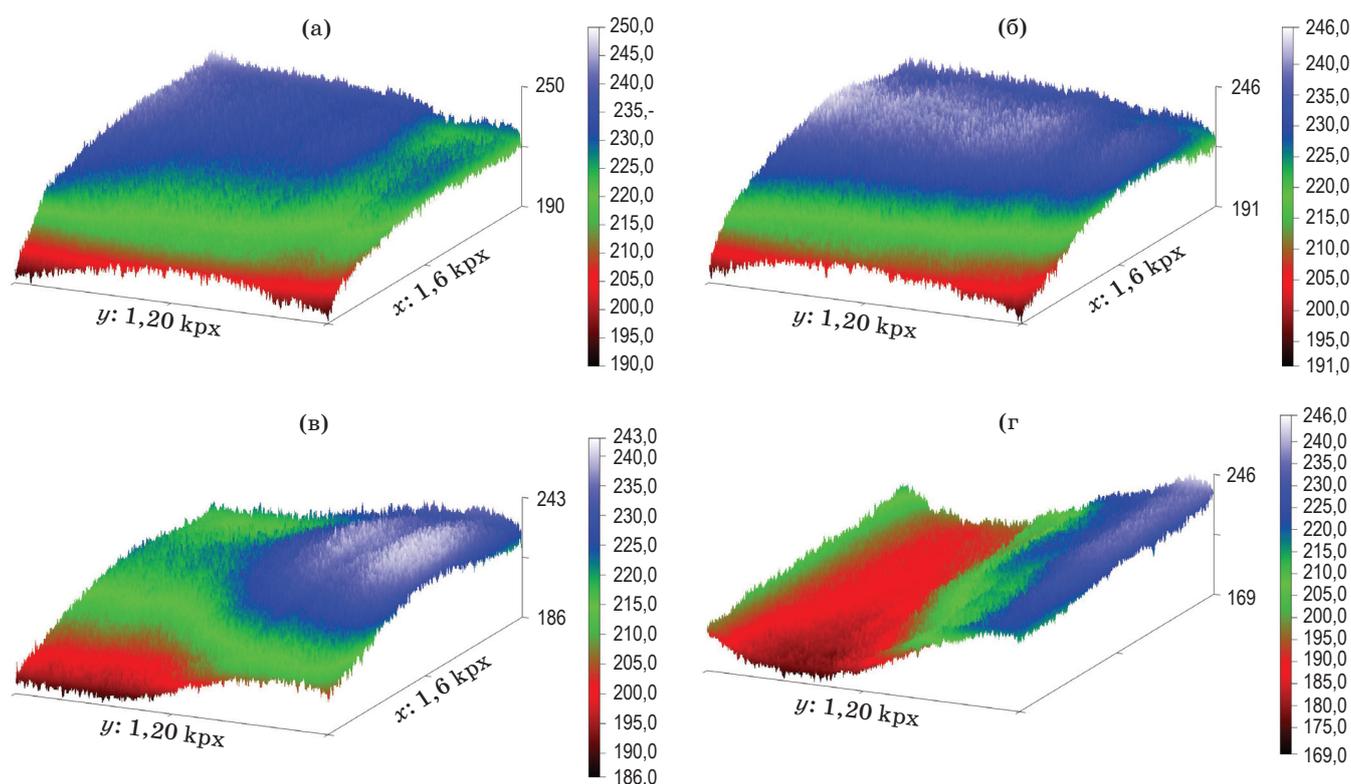


Рис. 6. Распределение яркости в канале blue, построенного в ложных цветах из изображения образца золота без плёнки. А — объектив с увеличением $5\times$, б — объектив с увеличением $20\times$, в — объектив с увеличением $50\times$, г — объектив $100\times$.

наличие плёнки не на однородной поверхности золота или полупроводника, а на площадках активных элементов, которые имеют размеры от единиц до сотен мкм^2 . В связи с этим, необходимо сравнивать область на эталоне, освещённую точно так же, как и исследуемая площадка на образце, то есть сравнивать области на изображениях с одинаковыми координатами. Для решения этой задачи была реализована программа на языке Visual Basic Net, исходный код которой приведён в приложении. Программа позволяет выделить интересующую область на исследуемом изображении и сравнить её с точно такой же областью на эталонном изображении, таким образом нивелируя влияние неоднородности засветки.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ RGB ДАННЫХ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАСТИНЫ

Планарная технология использует полупроводниковые пластины, поверхность которых

состоит из областей, покрытых диэлектриком, и областей, покрытых металлом. Анализ RGB данных можно использовать для контроля чистоты поверхности элементов полупроводниковой пластины после проведения операций фотолитографии для того, чтобы подтвердить отсутствие остатков технологического слоя фоторезиста.

Как следует из рис. 5, тонкие плёнки оксида кремния толщиной 2 нм и более можно детектировать с помощью анализа RGB данных снимков в случае, если подложка представляет собой золото. Если же подложка изготовлена из GaAs, то наличие плёнки 2 нм приводит к незначительному изменению значений в R-, G- и B-каналах, меньшему, чем доверительный интервал, равный 1,5%, что повышает минимальную обнаружимую толщину плёнки. В связи с этим, для детектирования тонких плёнок во время проведения операции контроля чистоты поверхности полупроводниковой пластины после операции фотолитографии целесообразнее проводить сравнение чистоты поверхности элементов, покрытых золотом,

чем чистых элементов полупроводника или элементов полупроводника, покрытых диэлектриком.

Для проведения операции контроля чистоты поверхности использовалась пластина GaAs, покрытая фоторезистом ФП-9120-2,0, изображённая на рис. 3. Оптические характеристики фоторезиста при этом были рассчитаны, исходя из измеренных спектров пропускания плёнки аналогичной толщины, нанесённой на прозрачную подложку из стекла К8. Показатель преломления задубленного фоторезиста на длине волны синего света 460 нм составил $n = 1,656$, коэффициент экстинкции $k = 0,0087$. Более высокий показатель преломления фоторезиста в коротковолновой области по сравнению с кремнием приводит к большему углу наклона кривой dI_B на рис. 5а, что увеличивает расчётный порог обнаружения тонкой плёнки для фоторезиста ФП-9120-2,0 до 1,5 нм.

Травление фоторезиста осуществлялось поэтапно в высокочастотной плазме кислорода при частоте 13,56 МГц на установке PICO в течении 5 мин. После травления производилось измерение RGB данных на микроскопе Olympus BX51M с камерой DP73 с установленным объективом с увеличением $5\times$, после чего снова осуществлялось травление до тех пор, пока значение RGB на золотых площадках полупроводниковой пластины не стало отличаться от подложки с осаждённым на ней золотом менее чем на 1,5%. Зависимость от-

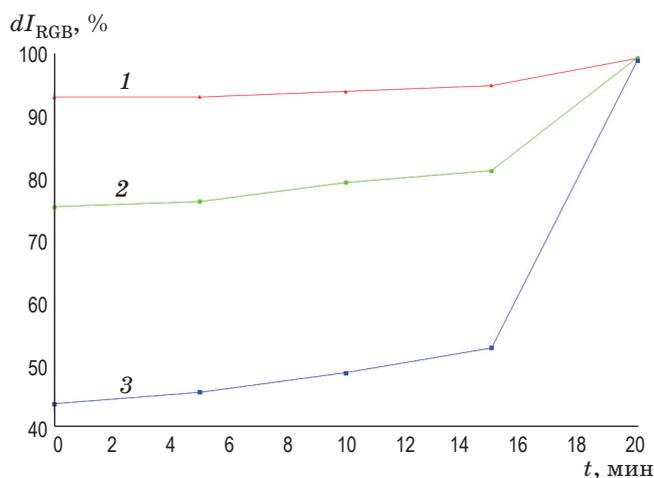


Рис. 7. Зависимость отношения значений в каналах от времени травления пластины с фоторезистом в кислородной плазме. 1 — R-канал, 2 — G-канал, 3 — B-канал.

ношений значений RGB образцов к значениям RGB образца чистого золота dI_{RGB} от времени травления приведена на рис. 7.

Как видно из рис. 7, при травлении фоторезиста значения отклонения в каналах уменьшаются от 43,7% в синем канале и 92,8% в красном до 99,06% в красном канале и 98,7% в синем канале, что лежит в пределах доверительного интервала. Таким образом, толщина фоторезиста на поверхности пластины после 20 мин обработки в плазме не превышает минимальной толщины плёнки, которую можно обнаружить с помощью данной камеры, то есть 1,5 нм.

Алгоритм получения снимков с использованием оптической микроскопии для последующего анализа их RGB данных можно представить в следующем виде:

1. Подготовка эталонного образца золота с чистой поверхностью, свободной от загрязнений.
2. Подготовка микроскопа к съёмке:
 - А. Установка достаточного освещения.
 - Б. Временная выдержка, необходимая для термостабилизации оптической системы.
 - В. Фокусировка на эталонном образце.
 - Г. Настройка программного обеспечения камеры, убирающего все нелинейные коррекции RGB сигнала (контраст, резкость, насыщенность, гамма и др.).
 - Д. Установка баланса белого по установленному эталонному образцу или ручная корректировка коэффициентов усиления значений в каждом канале до достижения равенства значений в каналах.

Е. Регулировка апертурной диафрагмы микроскопа для минимизации неравномерности освещённости наблюдаемой области образца.

Ж. Установка экспозиции для достижения максимальных значений в каналах, но менее 255.

3. Съёмка эталонного образца.
4. Съёмка исследуемого образца.
5. Выделение области интересов на изображении исследуемого образца и нахождение средних значений RGB этой области.

6. Выделение области на изображении эталонного образца с теми же координатами, что и у исследуемого образца, и нахождение средних значений RGB этой области.

7. Нахождение отношения средних значений RGB исследуемой области к эталонной.

ВЫВОДЫ

В ходе проведённых исследований было показано, что метод анализа RGB данных, полученных с помощью светлопольной оптической микроскопии, оборудованной фотосенсором с матрицей Байера, позволяет судить о наличии прозрачного диэлектрика на золотой поверхности. В случае с фоторезистом ФП-9120-2,0 расчётная минимальная толщина плёнки, которую можно обнаружить при помощи используемой в работе камеры, составляет 1,5 нм, в случае оксида кремния — 2 нм. В случае изменения материала подложки с золота на арсенид галлия точность метода снижается, поэтому контроль чистоты поверхности полупроводниковых пластин в производственном планарном цикле целесообразнее проводить по активным элементам с золотой металлизацией. В общем случае, точность метода зави-

сит от сродства коэффициентов преломления плёнки и подложки и качества поверхности исследуемого образца.

Показана возможность расчёта толщины покрытия в случае, если известны спектральные чувствительности фильтров матрицы Байера используемой камеры и оптические характеристики плёнки и подложки. Приведён алгоритм получения снимков для последующего анализа их RGB данных и разработано программное обеспечение, позволяющее находить отношение средних значений RGB интересующей области снимка исследуемого образца к средним значениям RGB области с такими же координатами эталонного образца.

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Исходный код на языке VB. NET для программы, усредняющей выделенную область на изображении поканально и сравнивающей её с такой же областью изображения эталона.

На форме располагаются два объекта PictureBox — первый для загрузки изображения эталона, второй — для загрузки исследуемого изображения.

Два объекта OpenFileDialog и два объекта Button с именем “browse” и “browse2” — служат для выбора изображений на жёстком диске.

Три объекта TextBox с именем “dra”, “dga”, “dba” служат для отображения отношений значений R, G и B исследуемой области к значениям R, G и B эталона.

Объект Button с именем “calculate_area” служит для запуска расчёта средних значений RGB выделенной области.

Код модуля:

```
Module Module1
    Function CalculateColor(img As Bitmap, startx As Integer, endx As Integer, starty As Integer, endy As Integer) As Color
        Dim R0, G0, B0, i%, j%, count%
        R = 0
        count = 0
        For i = startx To endx
            For j = starty To endy
                R = R + img.GetPixel(i, j).R
                G = G + img.GetPixel(i, j).G
                B = B + img.GetPixel(i, j).B
                count = count + 1
            Next
        Next
        R = Math.Round(R / count, 1, MidpointRounding.AwayFromZero)
        G = Math.Round(G / count, 1, MidpointRounding.AwayFromZero)
        B = Math.Round(B / count, 1, MidpointRounding.AwayFromZero)
        CalculateColor = Color.FromArgb(255, R, G, B)
    End Function
End Module
```

Код формы:

```

Public Class Form1
    Public Const sizeP = 500
    Dim x_start%, x_end%, y_start%, y_end%, r1!, g1!, b1!, r2!, g2!, b2!
    Private Sub browse_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles browse.Click
        Dim path$, hw!
        dra.Text = ""
        dga.Text = ""
        dba.Text = ""
        PictureBox1.Width = sizeP
        PictureBox1.Height = sizeP
        OpenFileDialog1.Filter = "Pictures |*.bmp;*.jpg;*.jpeg;*.png"
        OpenFileDialog1.FileName = ""
        Dim result As DialogResult = OpenFileDialog1.ShowDialog()
        If result = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
            path = OpenFileDialog1.FileName
            PictureBox1.Image = Image.FromFile(path)
            hw = PictureBox1.Image.Height / PictureBox1.Image.Width
            If hw > 1 Then
                PictureBox1.Width = PictureBox1.Width / hw
            ElseIf hw < 1 Then
                PictureBox1.Height = PictureBox1.Height * hw
            End If
        End If
    End Sub
    Private Sub PictureBox1_MouseDown(sender As Object, e As MouseEventArgs) Handles PictureBox1.
MouseDown
        If IsNothing(PictureBox1.Image) = True Then Exit Sub
        dra.Text = ""
        dga.Text = ""
        dba.Text = ""
        x_start = e.X
        y_start = e.Y
    End Sub
    Private Sub PictureBox1_MouseUp(sender As Object, e As MouseEventArgs) Handles PictureBox1.MouseUp
        If IsNothing(PictureBox1.Image) = True Then Exit Sub
        x_end = e.X
        y_end = e.Y
    End Sub
    Private Sub PictureBox2_MouseDown(sender As Object, e As MouseEventArgs) Handles PictureBox2.
MouseDown
        If IsNothing(PictureBox2.Image) = True Then Exit Sub
        dra.Text = ""
        dga.Text = ""
        dba.Text = ""
        x_start = e.X
        y_start = e.Y
    End Sub
    Private Sub PictureBox2_MouseUp(sender As Object, e As MouseEventArgs) Handles PictureBox2.MouseUp
        If IsNothing(PictureBox2.Image) = True Then Exit Sub
        x_end = e.X
        y_end = e.Y
    End Sub
    Private Sub calculate_area_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles calculate_area.Click
        Dim img As Bitmap
        Dim img2 As Bitmap
        Dim x1%, x2%, y1%, y2%, coeff!, bufer%
        img = PictureBox1.Image
        If IsNothing(img) = False And IsNothing(x_start) = False Then

```

```
coeff = PictureBox1.Image.Width / PictureBox1.Width
x1 = Math.Floor(x_start * coeff)
x2 = Math.Floor(x_end * coeff)
y1 = Math.Floor(y_start * coeff)
y2 = Math.Floor(y_end * coeff)
If x1 > x2 Then
    bufer = x1
    x1 = x2
    x2 = bufer
End If
If y1 > y2 Then
    bufer = y1
    y1 = y2
    y2 = bufer
End If
b1 = CalculateColor(img, x1, x2, y1, y2).B
g1 = CalculateColor(img, x1, x2, y1, y2).G
r1 = CalculateColor(img, x1, x2, y1, y2).R
End If
img2 = PictureBox2.Image
If IsNothing(img2) = False And IsNothing(x_start) = False And IsNothing(x_end) = False Then
    coeff = PictureBox2.Image.Width / PictureBox2.Width
    x1 = Math.Floor(x_start * coeff)
    x2 = Math.Floor(x_end * coeff)
    y1 = Math.Floor(y_start * coeff)
    y2 = Math.Floor(y_end * coeff)
    If x1 > x2 Then
        bufer = x1
        x1 = x2
        x2 = bufer
    End If
    If y1 > y2 Then
        bufer = y1
        y1 = y2
        y2 = bufer
    End If
    b2 = CalculateColor(img2, x1, x2, y1, y2).B
    g2 = CalculateColor(img2, x1, x2, y1, y2).G
    r2 = CalculateColor(img2, x1, x2, y1, y2).R
    If IsNothing(img2) = False And IsNothing(img) = False Then
        dra.Text = Math.Round(r2 * 100 / r1, 2)
        dga.Text = Math.Round(g2 * 100 / g1, 2)
        dba.Text = Math.Round(b2 * 100 / b1, 2)
    End If
End If
End Sub
Private Sub browse2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles browse2.Click
    Dim path$, hw!
    dra.Text = ""
    dga.Text = ""
    dba.Text = ""
    PictureBox2.Width = sizeP
    PictureBox2.Height = sizeP
    OpenFileDialog2.Filter = "Pictures |*.bmp;*.jpg;*.jpeg;*.png"
    OpenFileDialog2.FileName = ""
    Dim result As DialogResult = OpenFileDialog2.ShowDialog()
    If result = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
        path = OpenFileDialog2.FileName
    End If
End Sub
```

```
PictureBox2.Image = Image.FromFile(path)
hw = PictureBox2.Image.Height / PictureBox2.Image.Width
If hw > 1 Then
    PictureBox2.Width = PictureBox2.Width / hw
ElseIf hw < 1 Then
    PictureBox2.Height = PictureBox2.Height * hw
End If
End If
End Sub
Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
    PictureBox1.SizeMode = PictureBoxSizeMode.StretchImage
    PictureBox2.SizeMode = PictureBoxSizeMode.StretchImage
End Sub
End Class
```

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гладышев А.Г., Кулагина М.М., Блохин С.А. и др.* Технология формирования субмикронного поверхностного рельефа для эпитаксиальных структур GaAs с тонкими стоп-слоями AlGaAs // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 24. С. 9–15.
2. *Qiao Z., Tang X., Li X. et al.* Monolithic fabrication of InGaAs/GaAs/AlGaAs multiple wavelength quantum well laser diodes via impurity-free vacancy disordering quantum well intermixing // IEEE Journal of the Electron Devices Society. 2017. V. 5. № 2. P. 122–127.
3. *Erbert G., Bärwolff A., Sebastian J. et al.* High-power broad-area diode lasers and laser bars // Topics Appl. Phys. 2000. V. 78. P. 173–223.
4. *Newton I.* Optiks: a treatise of the reflections, refractions, inflections and colors of light. London: 1718. P. 168–206.
5. *Дьяченко А.А., Рябухо В.П.* Определение оптических толщин слоистых объектов по интерференционным цветам изображений в микроскопии белого света // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 670–679.
6. *Ouyang W., Liu X.Z., Li Q. et al.* Optical methods for determining thicknesses of few-layer graphene flakes // IOP Publishing Ltd Nanotechnology. 2013. V. 24. № 50. P. 505701.
7. *Li H., Wu J., Huang X. et al.* Rapid and reliable thickness identification of two-dimensional nanosheets using optical microscopy // ACS Nano. 2013 V. 7. № 11. P. 10344–10353.
8. *Kobayashi Y., Morimoto T., Sato I. et al.* Reconstructing shapes and appearances of thin film objects using RGB images // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas NV, 2016. P. 3774–3782.
9. *Goto E., Dogru M., Kojima T. et al.* Computer-synthesis of an interference color chart of human tear lipid layer by a colorimetric approach // Investigative Ophthalmology & Visual Science. 2003. V. 44. P. 4693–4697.
10. *Yakubovsky D., Arsenin A., Stebunov Y. et al.* Optical constants and structural properties of thin gold films // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 25574–25587.
11. *Cheremkhin P., Lesnichii V., Petrov N.* Use of spectral characteristics of DSLR cameras with Bayer filter sensors // Ltd Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 536. P. 012021.
12. *Macleod H.A.* Thin-film optical filters. London: Institute of Physics Publishing, 2001. 641 p.