ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ V-MO-SiO₂ БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

**В.И. Струнин^{1,2,3}, Л.В. Баранова^{1,2}, Б.Т. Байсова^{1,3}, С.А. Несов⁴,
П.М. Корусенко⁴, Н.А. Чириков^{1,2,3}**

¹Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Российская Федерация

²Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН,
Омск, Российская Федерация

³Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

⁴Омский научный центр СО РАН, Омск, Российская Федерация

Исследованы образцы брэгговского отражателя на основе пленок молибдена (Mo), ванадия (V), диоксида кремния (SiO₂) и алюминия (Al), сформированных методом магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере аргона. Изучен состав и химическое состояние покрытия образца на участке с напылением оксида кремния, без напыления, до и после травления. Определены причины плохой адгезии тонкопленочных слоев брэгговского отражателя и шероховатости поверхностей пленок, предложены пути их устранения.

Ключевые слова: брэгговский отражатель, пленки молибдена, диоксид кремния, метод РФЭС.

STUDY OF THE STRUCTURE OF V-MO-SiO₂ BRAGG REFLECTOR OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING

**V.I. Strunin^{1,2,3}, L.V. Baranova^{1,2}, B.T. Baysova^{1,3}, S.N. Nesov⁴,
P.M. Korusenko⁴, N.A. Chirikov^{1,2,3}**

¹Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

²Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS,
Omsk, Russian Federation

³Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

⁴Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russian Federation

Samples of the Bragg reflector based on films of molybdenum (Mo), vanadium (V), silicon dioxide (SiO₂), and aluminum (Al) formed by direct current magnetron sputtering in an argon atmosphere are studied. The composition and chemical state of the coating of the sample were studied in the area with deposition of silicon oxide, without spraying, before and after etching. The causes of poor adhesion of thin-film layers of the Bragg reflector and the roughness of the surfaces of the films are determined, and ways to eliminate them are proposed.

Keywords: bragg reflector, films of molybdenum, silicon dioxide, XPS method.

Введение

Развитие современных систем связи, радионавигации и радиолокации требует постоянного совершенствования устройств частотной селекции и генерации сигналов. В последние годы отражательные и передаточные свойства многослойных структур широко используются в технике акустоэлектроники, полупроводниковой наноэлектроники и многослойной оптики. Большое внимание уделяется тонкопленочным акустическим СВЧ-резонаторам, которые обладают малыми размерами и малым весом. В таких устройствах подложка обеспечивает механическую прочность, а для акустической изоляции тонкопленочного преобразователя от подложки используются брэгговские отражатели, состоящие из чередующихся четвертьволновых слоев с большой разницей акустических импедансов [1].

Из всех материалов большим значением акустического импеданса для изготовления брэгговского отражателя обладает молибден, пленки которого легко получают методами ионного распыления. Они имеют хорошую адгезию к проводниковым и диэлектрическим пленкам. Удельное электрическое сопротивление молибдена примерно в 2 раза больше, чем у пленок алюминия, что позволяет использовать их и как электроды в акустоэлектрическом преобразователе. Пленки молибдена технологически совместимы со многими материалами, используемыми в микро- и акустоэлектронике. Другие материалы с большим значением акустического импеданса одновременно не обладают таким набором свойств. Поэтому брэгговский отражатель на основе пленок молибдена и двуокиси кремния рассматривается как перспективная структура для изготовления тонкопленочных СВЧ-резонаторов [2].

В работе рассмотрены брэгговские отражатели на основе пленок молибдена (Mo), ванадия (V), диоксида кремния (SiO₂) и алюминия (Al).

Пленки молибдена формировались методом магнетронного распыления мишени на постоянном токе в атмосфере аргона при относительно низких температурах подложки (450–700 К) на вакуумной установке нанесения многокомпонентных покрытий STEMS116-01 [3].

При данном способе формирования пленок молибдена не весь молибден в объеме пленки находится в металлическом состоянии, возможно присутствие небольшого количества как низших, так и высших (MoO₃) оксидов молибдена. В пленках оксида кремния также, кроме высшего оксида кремния SiO₂, присутствует небольшое количество субоксидов и оксинитридов кремния. Пленки данных оксидов создают в многослойной структуре тонкопленочного резонатора проблему обеспечения надежной адгезии тонкопленочных слоев, как между собой, так и с подложкой. Технология получения усложняется тем, что число слоев брэгговского отражателя может достигать 4–8 пар, поэтому полученная структура имеет достаточно большую толщину. В связи с этим, в структуре брэгговского отражателя из-за наличия оксидов пленок возникают еще большие механические напряжения и увеличивается шероховатость поверхности пленок. Механические напряжения становятся причиной появления микротрещин, растрескивания или отслаивания пленок от подложки. Шероховатость поверхности пленок может привести к рассеиванию объемных акустических волн (ОАВ) и нарушению нормальной работы брэгговского отражателя. Поэтому получение пленочных слоев для брэгговского отражателя с заданными характеристиками является актуальной проблемой в технологии изготовления тонкопленочных СВЧ-резонаторов [4].

Основной задачей качественного анализа поверхности являлось определение ее элементного состава, степеней окисления отдельных атомов, установление наличия определенных атомных групп, все это позволяет определить методы рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и электронной оже-спектроскопии (ЭОС). Этими же методами можно установить количественный состав поверхностей и тонких пленок.

В данной работе изучение состава и химического состояния покрытий было осуществлено с использованием метода РФЭС на аналитическом комплексе Surface Science Center (Riber).

Экспериментальная часть

Изучение состава и химического состояния покрытий было осуществлено с использованием метода РФЭС на аналитическом комплексе Surface Science Center (Riber). Для возбуждения рентгеновского излучения использовался источник с Al-анодом с энергией возбуждения линии Al равной 1486,6 эВ. XPS спектры были получены в условиях сверхвысокого вакуума ($\sim 10^{-9}$ Торр) с использованием анализатора типа двухкаскадного цилиндрического зеркала MAC-2. Диаметр рентгеновского пучка составлял ~ 5 мм, мощность источника 240 Вт. Разрешение по энергии при регистрации спектров основных линий составляло 0,7 эВ, обзорных спектров – 1,2 эВ и было постоянно во всем диапазоне измеряемых энергий.

Для получения информации о составе и химическом состоянии элементов покрытий в приповерхностной области образцов был использован послойный РФЭС анализ, который проводился непосредственно в камере спектрометра. Слой покрытия стравливался пучком ионов аргона со средней энергией 3 кэВ при давлении в камере спектрометра $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Подготовленные для исследований образцы закреплялись на держателях с помощью медного проводящего скотча, покрытого проводящим полимерным клеящим веществом. Поскольку многослойная пленка нанесена на диэлектрическую подложку (ситал), а также верхним слоем пленки является оксид кремния, то для предотвращения сильной зарядки поверхности образцов под воздействием рентгеновского пучка поверхность образца была «заземлена» на металлический держатель образцов с помощью медного проводящего скотча. Данный прием позволил избежать сильной дифференциальной зарядки поверхности, однако, несколько повлиял на результаты анализа количественного содержания элементов на поверхности анализируемых образцов.

Результаты анализа

1. Область с напылением SiO_2

На рис. 1 представлен обзорный спектр образца, измеренный на участке с напылением оксида кремния. В спектре присутствуют линии кислорода (O 1s), азота (N 1s), углерода (C 1s), а также кремния (Si 2s, Si 2p). Высокая интенсивность линии углерода обусловлена присутствием загрязнений на поверхности образца, а также наличием его в составе клеящего вещества медного скотча, использованного для стока заряда с поверхности образца. Из рисунка видно, что синглетные линии кислорода (O 1s), азота (N 1s), углерода (C 1s) обладают двумя максимумами, что связано с присутствием данных элементов как на заряжающейся поверхности диэлектрического образца (высокоэнергетические максимумы), так и на поверхности проводящего скотча (низкоэнергетические максимумы).

Рис. 1. Обзорный РФЭС спектр образца, измеренный на участке с напылением оксида кремния

На рис. 2 представлен подробный спектр линии углерода, который был использован, чтобы оценить величину сдвига фотоэлектронных линий, обусловленного зарядкой образца. Видно, что спектр имеет 3 максимума. Низкоэнергетический максимум при энергии связи 284,6 эВ соответствует состояниям углерода в углерод-углеродных связях (C-C). Положение данной линии совпадает с известными из литературы значениям энергии связи для углерода в углерод-углеродных связях [5]. Данный факт позволяет утверждать, что углерод присутствует на проводящей поверхности скотча и положение данного максимума может быть использовано для определения величины «зарядового» сдвига.

Рис. 2. РФЭС линии углерода C 1s (участок с напылением оксида кремния)

Максимум на энергии связи 287,3 эВ, по-видимому, соответствует состояниям углерода в углерод-углеродных связях, который присутствует на диэлектрической поверхности образца. Максимум на энергии связи 289,7 эВ отвечает состояниям углерода в одинарных и двойных углерод-кислородных химических связях (C-O/C=O). Данный углерод также присутствует на заряжающейся поверхности образца. Таким образом, данный спектр позволил определить величину зарядового сдвига, который в данном случае составляет 4,0 эВ. Наличие углерода на поверхности образца, предположительно, обусловлено загрязнением поверхности при хранении в атмосфере.

На рис. 3 представлен спектр линии кремния Si 2p после его калибровки на величину зарядового сдвига. Основной максимум линии расположен при значении энергии связи 104,0 эВ, что соответствует высшему оксиду кремния SiO_2 [5]. Однако спектр имеет некоторую несимметричность со стороны низких энергий связи, что позволяет говорить о присутствии некоторого количества субоксидов кремния SiO_x ($x < 2$). Кроме того, присутствие линий азота в обзорном спектре данного образца позволяет предполагать наличие некоторого количества оксинитрида кремния ($\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$). Результат разложения линии на компоненты показывает наличие низкоэнергетического компонента (102,8 эВ), положение которого соответствует как субоксидам кремния, так и оксинитриду кремния.

Рис. 3. РФЭС линии кремния Si 2p (участок с напылением оксида кремния)

В силу присутствия поверхностных загрязнений корректный анализ поверхности образца затруднен. Поэтому поверхность образца была подвержена ионному травлению (Ar^+ , $E = 3$ кэВ) в течение 30 мин. Ориентировочная скорость травления составляет ~ 1 нм/мин.

2. Область с напылением SiO_2 после ионного травления

На рис. 4 представлен обзорный спектр образца, измеренный на участке с напылением оксида кремния после проведения ионного травления. В спектре присутствуют линии кислорода (O 1s), азота (N 1s), углерода (C 1s), а также кремния (Si 2s, Si 2p). Интенсивность линии углерода значительно снижена по сравнению со спектром исходной поверхности (см. рис. 1). Из рис. 4 хорошо видно, что синглетная линия азота N 1s имеет два максимума. Это указывает на присутствие азота как в составе скотча, заземляющего образец, так и в составе пленки оксида кремния. Это, в свою очередь, свидетельствует в пользу предположения о наличии в составе образца небольшого количества оксинитрида кремния.

Рис. 4. Обзорный РФЭС спектр образца, измеренный на участке с напылением оксида кремния после ионного травления

Для определения величины зарядового сдвига был использован подробный спектр линии углерода C 1s (рис. 5). Из рисунка видно, что наиболее интенсивный максимум расположен на энергии связи 284,6 эВ. Данный максимум отвечает углероду, который присутствует на проводящей поверхности медного скотча. Максимум, расположенный на энергии связи 295,7 эВ, отвечает углероду, присутствующему в составе образца. Величина зарядового сдвига в данном случае составляет 11,5 эВ.

Рис. 5. РФЭС спектр линии углерода (C 1s) образца, измеренный на участке с напылением оксида кремния после ионного травления

Из рис. 5 также видно, что компонент, относящийся к углероду, в составе образца (295,7эВ) имеет симметричную (гауссовскую) форму, что указывает на его аморфное состояние. Тогда как компонент углеродного спектра, относящийся к клеящему полимеру, обладает характерной для sp^2 -гибридизированного углерода несимметричностью со стороны высоких энергий связи (это поможет исключить из количественных расчетов углерод, не входящий в состав образца).

Анализ подробного спектра линии углерода (рис. 5) позволяет также заключить, что большая часть углерода, вносящего вклад в обзорный спектр, не входит в состав поверхности. Данный факт позволяет нам скорректировать результаты при проведении количественного состава образца и исключить из расчета площадь низкоэнергетического компонента спектра, отвечающего углероду, который входит в состав клеящего вещества скотча. Аналогичным образом было скорректировано содержание азота и кислорода. Результаты количественного анализа с учетом корректировки представлены в табл. 1. Для удобства результаты представлены в атомных и весовых процентах.

Таблица 1

**Результаты количественного элементного анализа по данным РФЭС
(по обзорному спектру (рис. 4))**

Концентрация, % ат.			
[O]	[Si]	[N]	[C]
60,8	32,2	2,5	4,5
Концентрация, вес. %			
49,5	46,0	1,7	2,8

Как видно из данных табл. 1, отношение атомарных концентраций кислорода к кремнию [O]/[Si] составляет 1,8. Это указывает на возможное присутствие небольшого количества субоксидов и, возможно, оксинитрида кремния.

На рис. 6 представлены результаты анализа линии кремния Si 2p. Видно, что в спектре преобладает компонент с максимумом на энергии связи 104 эВ, который соответствует оксиду SiO_2 . Присутствует также компонент на энергии связи 102,8 эВ, который отвечает субоксидам кремния SiO_x ($x < 2$), а также оксинитриду кремния (SiO_xN_{1-x}). Интегральная площадь данного компонента составляет около 10 % суммарной площади пика.

Рис. 6. РФЭС линии кремния Si 2p (участок с напылением оксида кремния после ионного травления)

Разделение пиков углерода, азота и кислорода на две составляющие, отвечающие указанным элементам, которые находятся на заряжающейся поверхности образца и незаряжа-

ющейся поверхности скотча, дают нам также возможность уточнить состав клеящего полимера. С использованием подробных спектров, представленных на рис. 7, и обзорного спектра образца (рис. 4), состав клеящего полимера был определен как $C_{87}O_{10}N_3$.

Рис 7. РФЭС спектры углерода (а), кислорода (б) и азота (в) для области образца с напылением SiO_2 после ионного травления

Эти расчеты позволяют в дальнейшем исключать из количественных расчетов углерод, кислород и азот, не входящие в состав образца.

3. Область без напыления SiO_2

Применялся послойный анализ образца для того, чтобы исследовать состав поверхности образца (с сформировавшимся естественным оксидным слоем), а также с применением ионного травления изучить состав образца на некоторой глубине от поверхности (на которой будет обнаружен молибден в металлическом состоянии). Спектры образца измерялись после 5, 10, 15, 30 и 45 мин. ионного травления. Изменение химического состояния молибдена с увеличением времени травления было зафиксировано после 45 мин. травления, когда преобладающая часть молибдена уже находилась в металлическом состоянии. Исходя из различий атомной массы кремния (~ 28 а.е.м.) и молибдена (~ 96 а.е.м.) можно предположить, что скорость травления молибдена составляет примерно 0,3–0,4 нм/мин.

На рис. 8. представлены обзорные РФЭС спектры образца на участке без напыления кремния до и после 45-минутного травления. В данном случае поверхность образца, по-видимому, обладает большей проводимостью, и заряд полностью «стекает» через «заземляющую» полосу скотча, приклеенную к поверхности образца. Поэтому значительного сдвига линий в спектрах не наблюдалось.

Рис. 8. Обзорный РФЭС спектр образца, измеренный на участке без напыления оксида кремния: (1) – поверхность; (2) – после 45 мин ионного травления

В спектре исходной поверхности образца (рис. 8, кривая 1) присутствуют линии кислорода (O 1s), молибдена (Mo 3p, Mo 3d), азота (N 1s) (линии Mo 3d, N 1s перекрываются), углерода (C 1s) и кремния (Si 2s, Si 2p). Присутствие линий кремния, по-видимому, обусловлено «подпылением» оксида кремния под маску при его нанесении на образец.

В обзорном спектре образца после 45-минутного травления (рис. 8, кривая 2) наблюдаются интенсивные линии молибдена (Mo 3d, Mo 3p, Mo 3s, Mo 4p, Mo 4s), кислорода (O 1s) и углерода (C 1s). Высокая интенсивность линий кислорода и углерода в данном случае обусловлена сигналом от заземляющей полоски проводящего скотча. Однако сигнал от образца и скотча не разделяется ввиду хорошей проводимости поверхности образца.

В табл. 2 представлены результаты количественного элементного анализа образца, проведенного по обзорным РФЭС спектрам (рис. 8).

Таблица 2

**Результаты количественного элементного анализа по данным РФЭС
(по обзорным спектрам (рис. 8))**

Время травления, минута	Концентрация, % ат.			
	[Mo]	[O]	[C]	[Si]
0	3,5	10,8	82,7	3,0
45	16,1	17,1	66,8	—

Отметим, что в табл. 2 отсутствуют данные о концентрации азота, поскольку линии азота N 1s и молибдена Mo 3p перекрываются. Однако в составе исходной поверхности образца некоторая концентрация азота все-таки присутствует (рис. 9). Наличие на поверхности азота и кремния свидетельствует о возможном формировании некоторого количества оксинитрида кремния при его нанесении.

На рис. 10 представлены РФЭС спектры Mo 3d, измеренные после различных этапов ионного травления. Главный максимум спектра исходной поверхности лежит на энергии связи 232,7 эВ, что, по данным литературы [5], соответствует высшему оксиду молибдена MoO₃. С увеличением времени травления максимум линии постепенно смещается в сторону низких энергий связи, что указывает на постепенное снижение количества кислорода в составе оксида. В спектрах после 30 и 45 мин. ионного травления максимум расположен при энергии связи 227,7 эВ, что отвечает молибдену в металлическом состоянии. Наличие оксида молибдена в верхних слоях пленки, по-видимому, обусловлено его естественным окислением в атмосфере.

Рис 9. РФЭС спектр Mo 3p + N 1s исходной поверхности образца (область без напыления оксида кремния)

Рис 10. РФЭС спектры молибдена (Mo 3d) образца (участок без оксида кремния), измеренные на различных этапах ионного травления

Для более детального анализа состояния молибдена спектры, измеренные на исходной поверхности, а также после 45 мин. ионного травления были разложены на компоненты (рис. 10). В спектре исходной поверхности (рис. 11а) присутствуют дублетные компоненты, отвечающие оксидам MoO_3 (энергия связи главного максимума 232,7 эВ) и MoO_2 (энергия связи главного максимума ~ 230 эВ). Кроме того, в спектре присутствует интенсивный компонент (энергия связи главного максимума ~ 231 эВ), который, по-видимому, отвечает некоторому промежуточному оксиду (Mo^{5+}).

В спектре молибдена после 45 мин ионного травления (рис. 11б) основной компонент (энергия связи главного максимума ~ 227,7 эВ) отвечает молибдену в металлическом состоянии [2]. Однако со стороны больших энергий связи присутствует также компонент, который по энергетическому положению может отвечать оксиду MoO_2 . Интегральная площадь данного компонента составляет ~ 10% суммарной площади пика. Данный результат, с одной стороны, может свидетельствовать о некотором окислении молибдена при его нанесении. С другой стороны, наличие в спектре оксидных состояний может являться следствием так называемого «эффекта кратера», проявляющегося при достаточно больших временах травления (данный эффект связан с тем, что лунка травления имеет меньший диаметр по сравнению с зондирующим рентгеновским пучком).

Рис. 11. РФЭС спектры Mo 3d: (а) – исходная поверхность; (б) – после травления 45 мин

Корректировка количественного состава образца после ионного травления (45 мин), представленного в табл. 2, проводилась с использованием детального анализа спектра кислорода, а также «формулы», характеризующей состав клеящего полимера, которая была определена выше. Результаты разложения показывают (рис. 12), что кислород присутствует в двух химически неэквивалентных состояниях. Компонент с меньшей энергией связи (~529,0 эВ) отвечает кислороду в составе оксида молибдена. Компонент с большей энергией связи (~532,5 эВ) отвечает кислороду, химически связанному с углеродом. Данный компонент, судя по всему, связан с сигналом от проводящего скотча. Учитывая относительную долю данного компонента (рис. 12), общее содержание кислорода (табл. 2), можно заключить, что примерно 8 % ат. кислорода от его общего количества (17,1% ат.) входит в состав полимерного клея. Далее с учетом «формулы» полимера можно сделать заключение, что практически весь углерод, наблюдаемый в обзорном спектре образца после травления (рис. 8) связан с сигналом от проводящего скотча.

Рис. 12. РФЭС спектр кислорода образца № 1 (участок без напыления оксида кремния) после 45 минут ионного травления

Проведенный анализ позволяет уточнить состав образца после ионного травления. Скорректированные результаты представлены в табл. 3.

**Результаты скорректированного количественного элементного анализа
по данным РФЭС**

Время травления, минуты	Концентрация, % ат.			
	[Mo]	[O]	[C]	[Si]
45	56,3	43,7	–	–
Концентрация, вес. %				
45	88,5	11,5		

Также были измерены спектры валентной зоны исследуемого образца (рис. 13). Представлены спектры исходной поверхности образца (на участке без напыления кремния), а также данного участка после 45 мин. ионного травления. Видно, что после ионного травления (рис. 13, кривая 2) наблюдается значительное увеличение плотности занятых состояний вблизи уровня Ферми, что обусловлено увеличением количества металлического молибдена.

Рис. 13. РФЭС спектры валентной зоны образца №1 (участок без напыления оксида кремния): (1) – исходная поверхность; (2) – после ионного травления в течение 45 мин.

Закключение

Таким образом, методом РФЭС было установлено, что пленка оксида кремния на образце представлена преимущественно высшим оксидом кремния SiO_2 , однако полученные данные указывают на наличие небольшого количества субоксидов и оксинитридов кремния, общее количество которых в образце составляет не более 10 % ат. Низкое содержание загрязняющего углерода (всего 4 % ат.) свидетельствует о высокой чистоте процесса осаждения пленки оксида кремния. Анализ участка образца без слоя оксида кремния позволил установить, что в верхнем слое образца преобладают оксиды молибдена, сформированные, по-видимому, естественным образом при хранении образца на атмосфере. Проведенный послойный анализ показал, что в объеме пленки молибден находится преимущественно в металлическом состоянии, однако полностью исключить присутствие небольшого количества низших оксидов молибдена в объеме пленки нельзя. Процесс нанесения пленки молибдена является достаточно чистым. Анализ химического состояния молибдена в приповерхностной области показал, что образец после отжига в атмосфере O_2 обладает значительно большей толщиной поверхностного оксида. Кроме того, можно сделать вывод, что в результате отжига образца в приповерхностной области формируется градиентная оксидная пленка, в которой количество кислорода постепенно снижается с удалением от поверхности. Наличие тонкого оксидного слоя на поверхности образца, очевидно, обусловлено его естественным окислением при хранении на атмосфере.

Для обеспечения надежной адгезии тонкопленочных слоев между собой необходимо устранить причины образования высших и низших оксидов молибдена, субоксидов и оксинитридов кремния либо их исключить для уменьшения шероховатости поверхностей пленок.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ тонкопленочных брэгговских структур и пьезоэлектрических СВЧ-резонаторов на их основе / Г.Д. Мансфельд [и др.] // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 11. С. 1387–1395.
2. Способ сглаживания поверхности пленки алюминия на диэлектрической подложке: патент на изобретение / Зима А.Н., Козлов А.Г., Танская Т.Н. №217.015.С1ВЕ, заявл. 25.08.2017.
3. Механические напряжения в пленках молибдена, сформированных методом магнетронного распыления на ситалловой подложке // Проблемы машиноведения: матер. III Междунар. науч.-техн. конф. (23–24 апр. 2019 г., Омск, Россия) / Минобрнауки России [и др.]; [науч. ред. П. Д. Балакин]: в 2 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019.
4. Зима А.Н., Козлов А.Г., Танская Т.Н. Тонкопленочный резонатор с брэгговским отражателем // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. М.: МИРЭА, 2014. Т. 14, № 4. С 11–14.
5. Таблицы спектральных линий: справочник / Зайдель А.Н. [и др.]. М.: Наука, 1977.