

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. Т. 25, № 3. С. 238—244.
DOI: 10.17073/1609-3577-2022-3-238-244

УДК 621.315.61:539.23

Механизм образования пленкообразующей среды при высокочастотном напылении сегнетокерамики состава $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$

© 2022 г. М. С. Афанасьев¹✉

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук (фрязинский филиал),
пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: gvc@ms.ire.rssi.ru

Аннотация. Рассмотрен механизм образования пленкообразующей среды при высокочастотном напылении пленок титаната бария стронция ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) в кислороде. Исследование пленкообразующей среды методом масс-спектрометрии показало, что при распылении $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ в кислородной плазме энергия ионов кислорода 10^{-17} — 10^{-16} Дж достаточна для перевода многоатомных молекул с поверхности в газовую фазу и недостаточна для разрушения молекулы на составные компоненты как в веществе мишени, так и в газовой фазе. Анализ масс-спектров показал, что в диапазоне напряжений 450—550 В, в газовой фазе регистрируются ионизированные частицы с массовым числом 190—200, близкие к молярной массе соединения $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_{3\pm x}$. Выращенные поликристаллические пленки по химическому составу аналогичны составу мишени $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$. При увеличении напряжении смещения в пленкообразующей среде вместе с $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_{3\pm x}$ регистрируются ионы с более низкими массами, причем концентрация числа ионов с низкой массой увеличивается с возрастанием напряжения смещения, а сформированные поликристаллические пленки, наряду с $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$, содержат соединения $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, BaO и SrO . Показана динамика образования пленкообразующей среды при напылении пленок $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$. Установлены параметры высокочастотного разряда, условия и режимы, необходимые для воспроизводимого выращивания пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$.

Ключевые слова: тонкопленочная сегнетокерамика, высокочастотная кислородная плазма, спектр излучения, пленкообразующая среда, энергия иона, механизм распыления

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00493).

Для цитирования: Афанасьев М.С. Механизм образования пленкообразующей среды при высокочастотном напылении сегнетокерамики состава $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2022; 25(3): 238—244. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-238-244>

Mechanism of formation of a film-forming environment during RF sputtering of ferroelectrics $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$

M. S. Afanasyev¹✉

¹ *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation*

✉ Corresponding author: gvc@ms.ire.rssi.ru

Abstract. The mechanism of formation of a film-forming medium during high-frequency deposition of strontium barium titan ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) films in oxygen is considered. The study of the film-forming medium by mass spectrometry showed that when spraying $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ in oxygen plasma, the energy of oxygen ions 10^{-17} – 10^{-16} J is sufficient to transfer polyatomic molecules from the surface to the gas phase and insufficient to break the molecule into its constituent components both in the target substance and in the gas phase. The analysis of the mass spectra showed that in the voltage range 450–550 V, ionized particles with a mass number of 190–200, close to the molar mass of the compound $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_{3\pm x}$ are registered in the gas phase. The grown polycrystalline films are chemically similar to the composition of the target $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$. With an increase in the bias voltage, ions with lower masses are recorded in the film-forming medium together with $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_{3\pm x}$, and the concentration of the number of ions with low mass increases with increasing bias voltage, and the formed polycrystalline films, along with $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$, contain compounds $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, BaO and SrO . The dynamics of the formation of a film-forming medium during the deposition of $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ films is shown. The parameters of the high-frequency discharge, conditions and modes necessary for reproducible growth of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ films are established.

Keywords: thin-film ferroelectric ceramics, high-frequency oxygen plasma, emission spectrum, film-forming medium, ion energy, sputtering mechanism

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00493).

For citation: Afanasyev M.S. Mechanism of formation of a film-forming environment during RF sputtering of ferroelectrics $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(3): 238–244. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-238-244>

Введение

Тонкопленочная сегнетокерамика, применяемая в изделиях микроэлектроники, представляет собой простые и сложные оксиды [1]. В методах напыления оксидов применяют, в том числе, вакуумные технологии, которые основаны на использовании высокочастотного (ВЧ) разряда и низкотемпературной кислородной плазмы при повышенных давлениях кислорода [2]. В работе [3] на установке «Плазма–50 СЭ» методом ВЧ-напыления выращены на нагретых до 750 °С подложках кремния и оксида магния гомогенные пленки сегнетокерамики состава $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ из мишени аналогичного

состава при давлении кислорода более 0,45 Торр (1 Торр = 133,32 Па) и напряжении смещения мишень — подложка 450–550 В.

Оптический мониторинг процесса напыления пленок $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ выявил, что ВЧ-мощность, рассеиваемая в низкотемпературной кислородной плазме при распылении сегнетокерамики, — фактор, определяющий фазовый и химический состав пленок и пленкообразующей среды.

Следует отметить, что сегнетокерамика на основе твердого раствора $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ во всем диапазоне составов обладает всеми свойствами, присущими сегнетоэлектрику, что позволяет варьировать свойствами сегнетоэлектрика не только

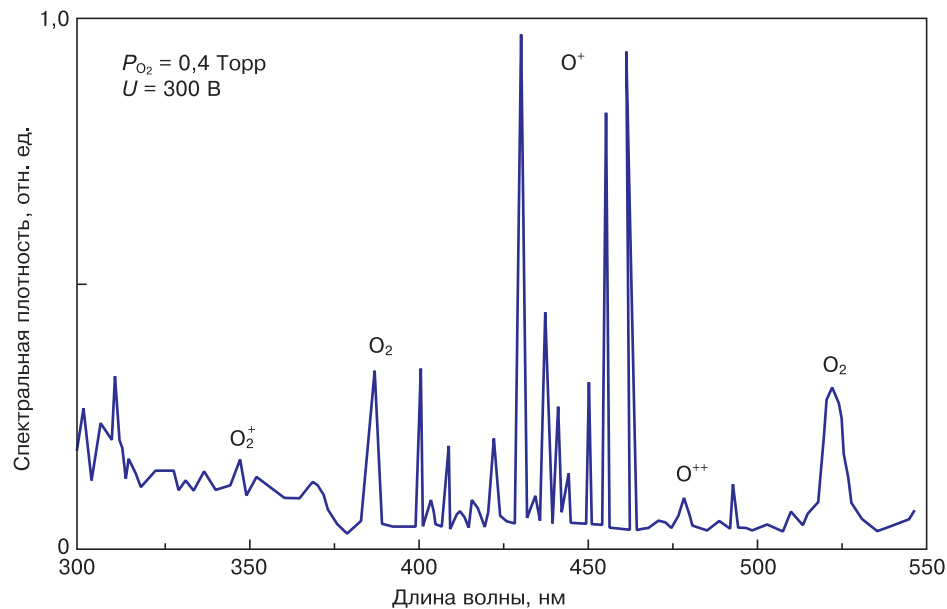


Рис. 1. Спектр излучения ВЧ-разряда
Fig. 1. Radiation spectrum of a RF discharge

благодаря набору химических элементов, но и соотношением этих элементов.

Широкий выбор составов твердого раствора дает возможность усилить или нивелировать свойства сегнетоэлектрика и на основе одного материала и технологии расширить номенклатуру изделий микроэлектроники.

Синтез методом ВЧ-напыления гомогенных пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ фиксированного состава определяется используемой технологией и зависит от режимов и условий напыления, а также от параметров технологического оборудования.

Ниже рассмотрено влияние параметров ВЧ-разряда на механизм образования пленкообразующей среды при распылении сегнетокерамики $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ с целью оптимизации режимов напыления гомогенных пленок, заданного состава.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Процесс ВЧ-напыления включает этап распыления керамической мишени $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ в низкотемпературной кислородной плазме (ВЧ-разряде) и этап конденсации компонент мишени (пленкообразующей среды) на подложку. Особенность метода ВЧ-напыления состоит в том, что в рамках одного процесса мы фактически имеем две системы: пленкообразующую среду, которая кристаллизуется на подложке в атмосфере кислорода (O_2), и непосредственно ВЧ-разряд в кислороде.

Оценка параметров ВЧ-разряда выполнена применительно к установке «Плазма-50СЭ» при давлении кислорода 0,1–0,9 Торр, напряжении U между электродами (мишень—подложка)

не более 1100 В. Конструктивные особенности «Плазма-50СЭ» следующие: расстояние от мишени до подложки 15 мм, диаметр мишени и подложки 80 и 20 мм соответственно, частота ВЧ-разряда 13,5 МГц.

На рис. 1 показан спектр излучения ВЧ-разряда в кислороде. На рис. 2 приведены данные

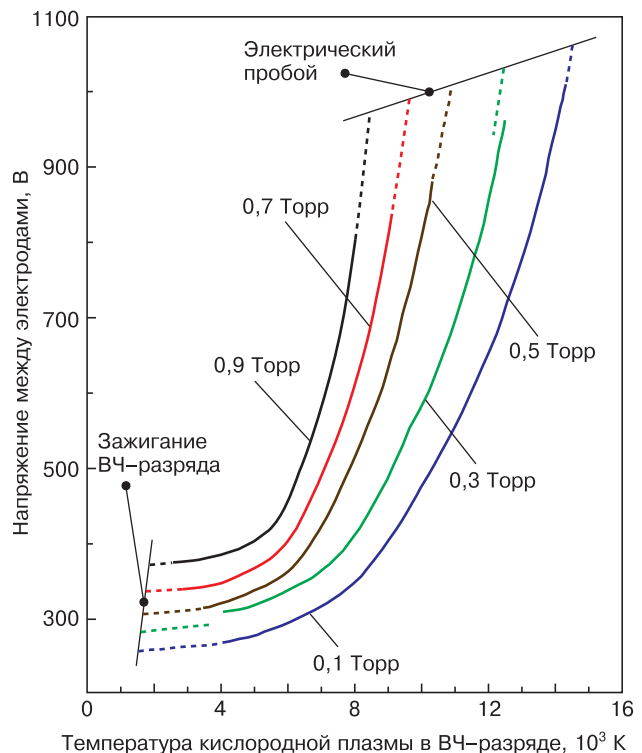


Рис. 2. Зависимости температуры ВЧ-разряда от напряжения между электродами при различном давлении кислорода

Fig. 2. Dependences of the RF discharge temperature on the voltage between the electrodes at various oxygen pressures

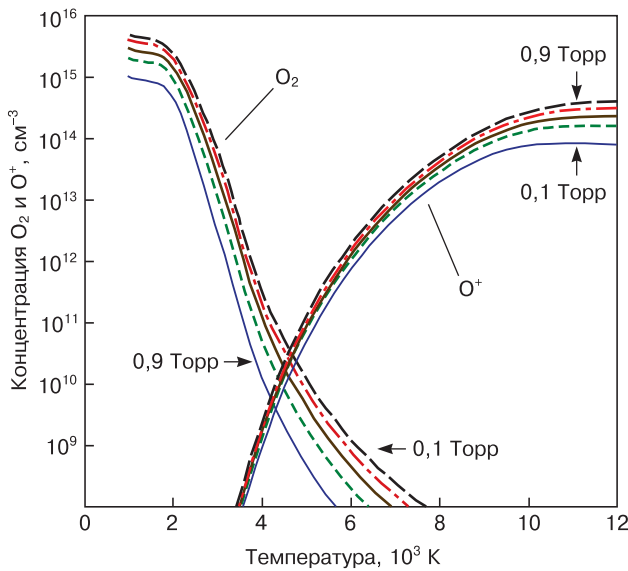


Рис. 3. Зависимости концентрации компонент кислородной плазмы от температуры для давления кислорода 0,1–0,9 Торр

Fig. 3. Dependences of the concentration of oxygen plasma components on temperature for an oxygen pressure of 0.1–0.9 Torr

зажигания и электрического пробоя ВЧ-разряда в низкотемпературной кислородной плазме, и приведены результаты расчета «кажущейся» температуры T ВЧ-разряда при различном напряжении U между электродами и давлении кислорода. Температура ВЧ-разряда рассчитана из выражения (1) по методикам, изложенным в работах [4, 5]:

$$I_p = \int_{300}^{550} i_\lambda d\lambda = \sigma_p T^4, \quad (1)$$

где i_λ , I_p — спектральная и интегральная плотность лучистой энергии соответственно; λ — длина волны излучения; σ_p — постоянная Стефана—Больцмана, $7,64 \cdot 10^{-16}$ Дж/($K^4 \cdot m^3$).

Расчет выполнен в максимуме спектральной плотности потока излучения в интервале длин волн 300–550 нм.

Расчетные значения концентрации компонент кислородной плазмы от температуры для давления кислорода 0,1–0,9 Торр (рис. 3) определены, согласно уравнению Саха [6]. В расчетах не учитывался вклад реакций $O_2 \rightleftharpoons O_2^+ + e^-$ и $O \rightleftharpoons O^{++} + e^-$ в силу пренебрежимо малой интенсивности O_2^+ и O^{++} в спектре излучения кислорода.

На рис. 4 представлены расчетные значения энергии E_Σ иона кислорода O^+ в плазме от приложенного между электродами ВЧ-напряжения.

В межэлектродном пространстве L ион кислорода O^+ с зарядом q массой m приобретает от приложенного к электродам напряжения смещения U с частотой $\omega = 13,5$ МГц кинетическую энергию $E_{ВЧ}$:

$$E_{ВЧ} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{q^2 U^2}{3m\omega^2} \right) L. \quad (2)$$

Исходные данные для расчета взяты из работ [7–9] при следующих допущениях:

- длина электромагнитной волны значительно превышает расстояние между электродами, в поперечном сечении ВЧ-разряда электрическое поле однородно;

- распределение ионов по скоростям и направлению в любой точке межэлектродного пространства одинаково, а вероятность столкновительной рекомбинации α мала, и $\alpha \rightarrow 0$.

Тепловая энергия $E_T \approx 3/2 kT$, полученная ионом кислорода в плазме с температурой $T \leq 12000$ К, не превышает 10^{-19} Дж.

На рис. 5 представлены расчетные данные глубины имплантации O^+ в твердый раствор $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ различного состава, на рис. 6 — коэффициент распыления $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ионами кислорода.

Глубина R имплантации иона O^+ в вещество мишени с концентрацией C атомов/молекул рассчитана по формулам Линхарда в модели «твердых шаров» и по формуле Бете как акт взаимодействия иона с электронными оболочками атомов вещества [10, 11]. Тормозная способность Ξ при взаимодействии с электронными оболочками атомов Ξ_a много меньше, чем торможение в результате столкновения с атомами вещества Ξ_e мишени. Принимая, что $\Xi_a \gg \Xi_e$, для расчета глубины имплантации O^+ с энергией E_Σ в $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ использовали формулу [12]

$$R = \frac{E_\Sigma}{C \Xi_a}. \quad (3)$$

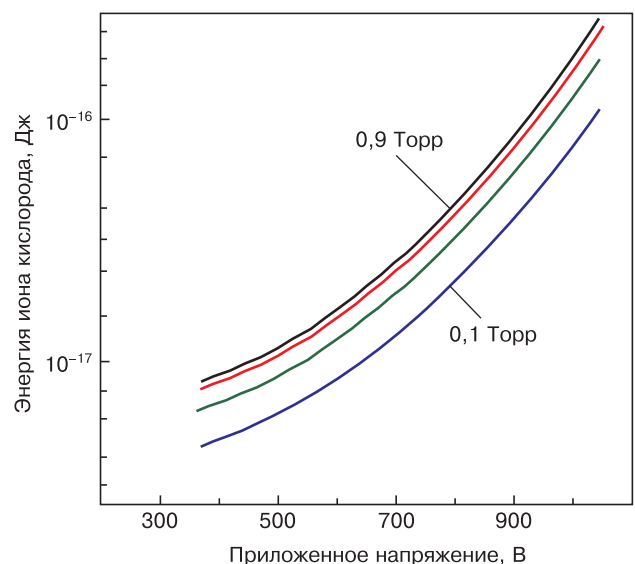


Рис. 4. Зависимости энергии иона кислорода E_Σ от приложенного ВЧ-напряжения для давления кислорода 0,1–0,9 Торр

Fig. 4. Dependences of the energy of the oxygen ion E_Σ on the applied RF voltage for an oxygen pressure of 0.1–0.9 Torr

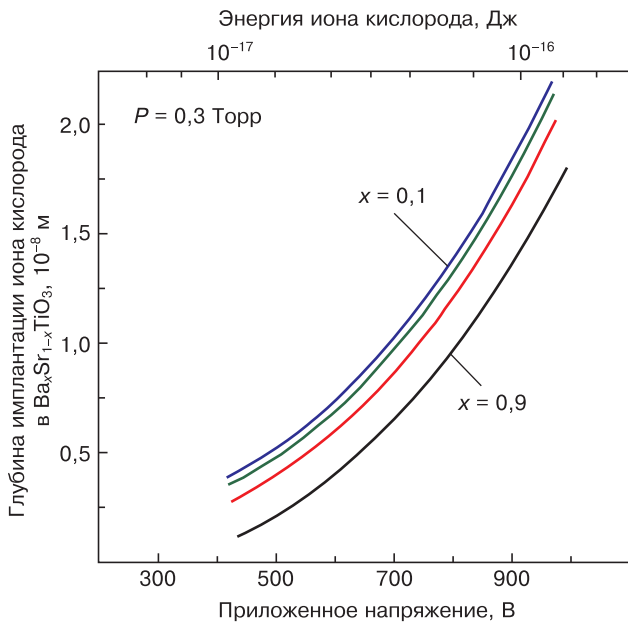


Рис. 5. Глубина имплантации O^+ в твердый раствор $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ различного состава

Fig. 5. Depth of O^+ implantation in a $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ solid solution of various compositions

Количественную оценку вещества, выбиваемого одним ионом кислорода из поверхностного слоя $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, отражает коэффициент распыления Y_p (см. рис. 6)

$$Y_p = \frac{3\beta M_i M_B}{2\pi^2 (M_i + M_B)^2 2E_{суб}} E_{\Sigma}, \quad (4)$$

где M_i, M_B — молекулярная масса иона и распыляемого вещества соответственно; E_{Σ} — энергия иона; $E_{суб}$ — энергия сублимации вещества; β — безраз-

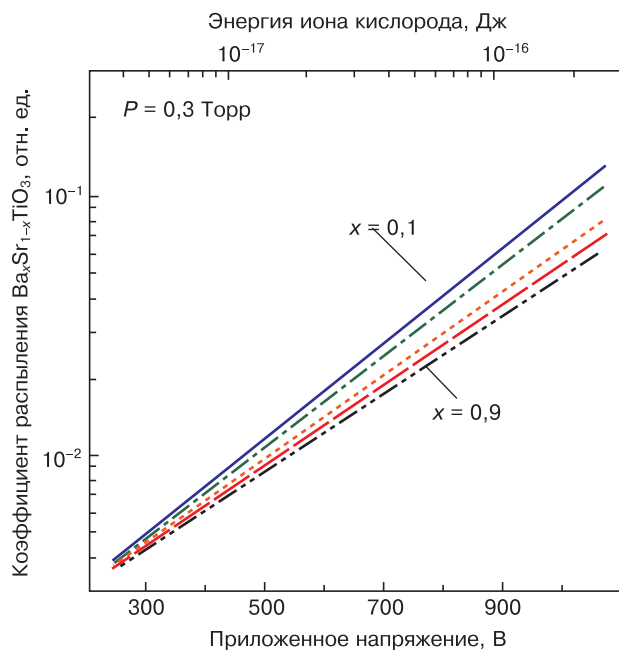


Рис. 6. Коэффициент распыления (Y_p) $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ионами кислорода

Fig. 6. Sputtering coefficient (Y_p) of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ by oxygen ions

мерный коэффициент, зависящий от отношения M_B/M_i [13].

Данные расчетов Y_p демонстрируют, что ~20—30 ионов O^+ с энергией $E_{\Sigma} \sim 10^{-17}—10^{-16}$ Дж при напряжении смещения мишень подложка 450—600 В способны выбить из мишени $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ многоатомные молекулы массой ~300 ед.

На установке по методике, изложенной в работе [3], исследованы условия напыления пленок $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$. Пленки напыляли из мишени аналогичного состава на подложку кремния КДБ-12, нагретую до 750 ± 5 °С, при напряжении смещения U мишень—подложка 300—700 В, давлении кислорода 0,45 Торр, обеспечивающее преобладание окислительного процесса.

В процессе напыления пленок состав пленкообразующей среды по массам ионов, отнесенных к их заряду, контролировали масс-спектрометром. Химический состав выращенных пленок определяли методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов методом [14], морфологию — оптическим методом.

Масс-спектры показали, что в диапазоне напряжений 450—550 В, в газовой фазе регистрируются ионизированные частицы с массовым числом 190—200, близкие к молярной массе соединения $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_{3\pm x}$. Выращенные поликристаллические пленки по химическому составу аналогичны составу мишени $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$. При увеличении напряжении смещения в пленкообразующей среде вместе с $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_{3\pm x}$ регистрируются ионы с более низкими массами, причем концентрация числа ионов с низкой массой увеличивается с возрастанием напряжении смещения, а сформированные поликристаллические пленки, наряду с $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$, содержат соединения $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, BaO и SrO . Динамику образования пленкообразующей среды при напылении $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ из мишени аналогичного состава демонстрирует рис. 7.

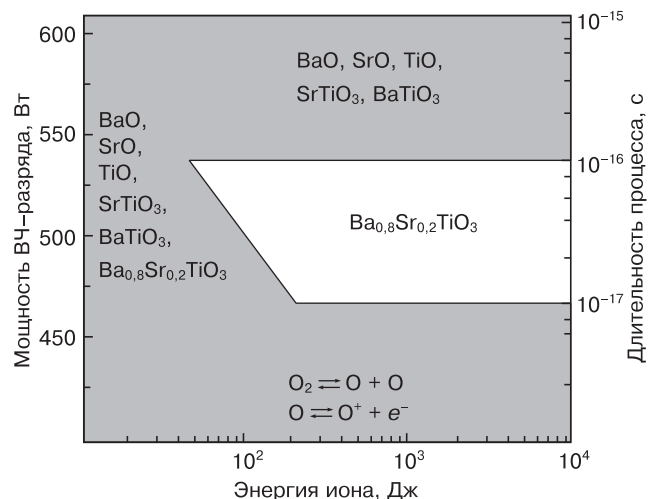


Рис. 7. Динамика образования пленкообразующей среды

Fig. 7. Dynamics of the formation of a film-forming medium

Заключение

Комплекс экспериментальных и теоретических исследований выявил, что при ВЧ-напылении пленок $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ в кислороде механизм образования пленкообразующей среды включает следующие этапы: ионизацию кислорода в ВЧ-разряде; имплантацию ионов кислорода O^+ в вещество мишени; перевод вещества мишени в газовую фазу.

Следует отметить, что этап имплантации кислорода в пленки $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ характерен тем, что имплантированный кислород, не изменяя химического состава вещества, способен в поверхностном слое снизить энергию связи составляющих компонент мишени [13].

На этапе распыления происходит перевод вещества мишени в газовую фазу. При энергии $O^+ \sim 10^{-17}—10^{-16}$ Дж процесс распыления подобен процессу ионной полировки [15], где энергия иона кислорода достаточна для перевода молекулярного слоя с многоатомными молекулами $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ с поверхности в газовую фазу и недостаточна для разрушения молекулы на составные компоненты как в веществе мишени, так и в газовой фазе.

Таким образом, проведенный комплекс исследований позволяет определить параметры ВЧ-разряда, условия и режимы, необходимые для воспроизводимого выращивания пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ заданного состава.

Библиографический список

1. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства. М.: Энергоатомиздат; 2011. 175 с.
2. Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН; 2008. 224 с.
3. Афанасьев М.С., Набиев А.Э., Чучева Г.В. Оптический мониторинг процесса осаждения сегнетоэлектрических пленок. *Физика твердого тела*. 2015; 57(7): 1354—1357.
4. Низкотемпературная плазма / под ред. В.С. Энгельшта, Б.А. Урюкова. В 11 т. Т. 1: Теория столба электрической дуги. Новосибирск: Наука; 1990. 375 с.
5. Методы исследования плазмы: спектроскопия, лазеры, зонды / под ред. В. Лохте-Хольтгревена; пер. с англ. М.: Мир; 1971. 552 с.
6. Физика и техника низкотемпературной плазмы / под ред. С.В. Дресвина. М.: Атомиздат; 1972. 352 с.
7. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат; 1991. 1232 с.
8. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. 3-е изд. М.: Атомиздат; 1969. 191 с.
9. Жданов С.К., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В. Основы физических процессов в плазме и пламенных установках / под ред. В.А. Курнаева. М.: МИФИ; 2007. 368 с.
10. Оцуки Е.-Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами / пер. с англ. М.: Мир; 1985. 277 с.
11. Линдхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц / пер. с англ. *Успехи физических наук*. 1969; 99(2): 249—296. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0099.196910c.0249>
12. Карзанов В.В., Королев Д.С. Ионное легирование кремния. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского; 2013. 21 с.
13. Данилин С.Б. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат; 1989. 328 с.
14. Афанасьев М.С., Егоров В.К., Чучева Г.В., Лучников П.А., Буров А.В. Диагностика наноразмерных сегнетоэлектрических пленок на полупроводниковых и диэлектрических подложках методом РОР-спектроскопии. *Наноматериалы и наноструктуры — XXI век*. 2011; 2(3): 50—57.
15. Технология тонких пленок / под ред. Л. Майселла, Р. Глэнга; пер. с англ. В 2 т. М.: Советское радио; 1977. Т. 1. 662 с.

References

1. Vorotilov K.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. Integrated ferroelectric devices. Moscow: Energoatomizdat; 2011. 175 p. (In Russ.)
2. Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I. Heterostructures based on nanosized ferroelectric films: fabrication, properties, and applications. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN; 2008. 224 p. (In Russ.)
3. Afanas'ev M.S., Chucheva G.V., Nabiev A.E. Optical monitoring of the deposition process of ferroelectric films. *Physics of the Solid State*. 2015; 57(7): 1377—1380. (In Russ.)
4. Engel'sht V.S., Uryukov B.A., eds. Low temperature plasma. In 11 vol. Vol. 1 Electric arc column theory. Novosibirsk: Nauka; 1990. 375 p. (In Russ.)
5. Lochte-Holtgrevena V., ed. Plasma research methods: spectroscopy, lasers, probes. 1971. 552 p. (Russ. transl.: Lokhte-Khol'tgreven V., ed. *Metody issledovaniya plazmy: spektroskopiya, lazery, zondy*. Moscow: Mir; 1971. 552 p.)
6. Dresvin S.V., ed. Physics and technology of low-temperature plasma. Moscow: Atomizdat; 1972. 352 p. (In Russ.)
7. Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z., eds. Physical quantities. Moscow: Energoatomizdat; 1991. p. (In Russ.)
8. Artsimovich L.A. Elementary plasma physics. Moscow: Atomizdat; 1969. 189 p. (In Russ.)
9. Kurnaev V.A., ed. Zhdanov S.K., Kurnaev V.A., Romanovskii M.K., Tsvetkov I.V. Fundamentals of physical processes in plasma and plasma installations. Moscow: MIFI; 2007. 368 p. (In Russ.)
10. Ohtsuki Y.-H. Charged beam interaction with solids. GB, London; USA, NY; 1983. 277 p. (Russ. transl.: Otsuki E.-Kh. *Vzaimodeistvie zaryazhennykh chastits s tverdyimi telami*. Moscow: Mir; 1985. 277 p.)
11. Lindhard J. Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles. Danish: Matematisk-Fysiske Meddelelser Konglige Danske Videnskabernes Selskab. 1965; 34(14). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0099.196910c.0249>

(Russ. Transl.: Lindkhard I. Vliyanie kristallicheskoj reshetki na dvizhenie bystrykh zaryazhennykh chastits. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 1969; 99(2): 249—296. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0099.196910c.0249>)

12. Karzanov V.V., Korolev D.S. Ionic doping of silicon. Nizhny Novgorod. Nizhegorodskii gosudarstvennyi universitet im. N.I. Lobachevskogo; 2013. 21 p. (In Russ.)

13. Danilin S.B. The use of low-temperature plasma for the deposition of thin films. Moscow: Energatomizdat; 1989. 328 p. (In Russ.)

14. Afanasev M.S., Egorov V.K., Chucheva G.V., Lychnikov P.A., Byrov A.V. Diagnostics of nanosized ferroelectric films on semiconductor and dielectric substrates using RBS-spectroscopy method. *Nanomaterials and Nanostructures — XXI Century*. 2011; 2(3): 50—57. (In Russ.)

15. Mysell L., Glang R., eds. Hand boor of thin film technology. In 2 vol. USA: McGraw Hill Hook Company; 1970. Vol. 1. 662 p. (Russ. Transl.: Maisell L., Gleng R., eds. *Tekhnologiya tonkikh plenok*. In 2 vol. Moscow: Sovetskoe radio; 1977. Vol. 1. 662 p.)

Информация об авторе / Information about the author

Афанасьев Михаил Сергеевич — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория № 251, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-5475-8616; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Mikhail S. Afanasyev — Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; ORCID 0000-0001-5475-8616; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 01.09.2022; поступила после доработки 20.09.2022; принята к публикации 22.09.2022
Received 01 September 2022; Revised 20 September 2022; Accepted 22 September 2022