

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫХ НАНОСТРУКТУР ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ С УЧЕТОМ РАСПЫЛЕНИЯ И ДИФФУЗИИ

О.А. Плаксин

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*

Р

Поиск и исследование структур, устойчивых к облучению, относятся к важным задачам радиационного материаловедения, включая проблемы радиационной стойкости конструкционных материалов и материалов диагностических систем ядерной энергетики. Оптические измерения в процессе имплантации тяжелых ионов в диэлектрики позволяют обнаруживать состояния структуры, динамически устойчивые во время облучения. В работе проведен анализ кинетики формирования динамически устойчивых наноструктур при имплантации кварцевого стекла ионами Au⁺ и Cu⁺ с энергией 60 кэВ в рамках одномерной модели эволюции распределения имплантированных атомов по глубине, учитывающей распыление поверхности имплантированного слоя, производство и диффузию имплантированной массы. Предложены способы оценки вкладов этих процессов в кинетику с использованием экспериментальных данных по распылению, изменению оптических свойств и изображений структуры. Показано, что распыление поверхности доминирует в кинетике насыщения при имплантации кварцевого стекла ионами Au⁺.

Ключевые слова: имплантация тяжелых ионов, радиационно-индуцированные процессы, наноструктуры, устойчивость при облучении.

ВВЕДЕНИЕ

Структуры, содержащие наночастицы металла, представляют интерес для множества применений в фотонике [1 – 4]. Для демонстрации возможности получения наночастиц металла, внедренных в слои прозрачных диэлектриков, широко используется имплантация тяжелых ионов [1]. Ионная имплантация позволяет преодолевать термодинамические и кинетические запреты, характерные для множества других методов, и быстро создавать необходимые нанокомпозиты при потоке ионов до 10¹⁵ ионов/см²·с [5]. Наночастицы металла, созданные методом ионной имплантации, используются также в качестве прекурсоров для получения наночастиц оксидов металлов [6].

В работах [7 – 13] оптические измерения в процессе ионной имплантации позволили установить стадии формирования слоев с внедренными наночастицами металла, фазовый состав слоев и химический состав фаз. Например, во время имп-

© О.А. Плаксин, 2016

лантации ионов меди в кварцевое стекло по спектрам оптического поглощения в области поверхностного плазменного резонанса в наночастицах меди можно следить за фазой металла, а по спектрам радиационно-индуцированной люминесценции – за имплантированными атомами меди в твердом растворе. По результатам оптических измерений были построены неравновесные фазовые диаграммы в координатах «поток ионов - флюенс ионов» [10 – 13].

Неравновесные фазовые диаграммы содержат области, аналогичные областям равновесных фазовых диаграмм, в частности, однофазную область твердого раствора имплантированных атомов и двухфазную область (твердый раствор с внедренными наночастицами металла). В однофазной области с ростом флюенса ионов увеличивается концентрация имплантированных атомов в твердом растворе. В двухфазной области с ростом флюенса ионов увеличивается доля металлической фазы при неизменном составе твердого раствора. Кроме этого, обнаруживается особая область – область насыщения. В состоянии насыщения, установившемся при облучении с постоянным потоком ионов, распределение наночастиц по размерам и глубине, а также химический и фазовый составы нанокompозита не зависят от флюенса ионов. Другими словами, в состоянии насыщения структура нанокompозита проявляет динамическую устойчивость в условиях обмена массой и энергией между нанокompозитом и окружающей средой, а дальнейшая ионная имплантация становится неэффективной. В динамически устойчивой структуре наблюдаются бимодальные распределения наночастиц по размерам и глубине залегания. Например, в кварцевом стекле крупные наночастицы меди располагаются в приповерхностном слое, отделенном обедненной зоной от мелких наночастиц, расположенных в глубине [14].

В работе [10] было проведено обсуждение вкладов радиационно-индуцированных процессов (распыление поверхности, радиационно-стимулированная диффузия, атомные столкновения, электронные возбуждения и т.д.) в кинетику насыщения нанокompозитов. Было отмечено недостаточное понимание роли процессов, влияющих на формирование динамически устойчивых структур. Кроме этого, не выяснены причины формирования обедненной зоны в имплантируемом слое. В работе проводится углубленный анализ кинетики насыщения для разработки подходов к оценке вкладов радиационно-индуцированных процессов.

НАСЫЩЕНИЕ ВСЛЕДСТВИЕ РАСПЫЛЕНИЯ

Имплантация тяжелых ионов сопровождается распылением поверхности облучаемого материала. На рисунке 1 представлены данные по толщине распыленного слоя кварцевого стекла при различной плотности тока ионов Cu^- и Au^- с энергией 60 кэВ. Логично предположить, что насыщение вызвано конкуренцией между накоплением имплантированных атомов и ионно-индуцированным распылением поверхности [10]. Если учитывать только эти два процесса, то временная эволюция концентрационного профиля имплантированных атомов дается следующим выражением:

$$\partial N(x,t) / \partial t = G(x) + SF \cdot \partial N(x,t) / \partial x, \quad (1)$$

где $N(x,t)$ – концентрация имплантированных атомов; $G(x)$ – локальная скорость имплантации (пропорциональна распределению имплантируемых ионов по длине пробега); S – эффективность распыления (изменение толщины на единицу флюенса); F – поток ионов. Будем считать, что поток ионов направлен слева направо (вдоль оси x), а облучаемая поверхность расположена при $x = 0$. Очевидно, что скорость имплантации и поток ионов связаны между собой:

$$F = \int_0^{\infty} G(x) dx. \quad (2)$$

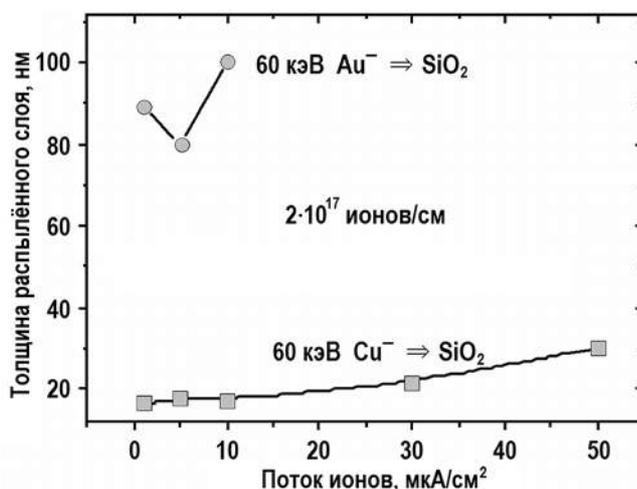


Рис. 1. Толщина распыленного слоя кварцевого стекла, имплантированного ионами Au⁻ или Cu⁻ с энергией 60 кэВ при различных потоках ионов до флюенса 2·10¹⁷ ионов/см²

Измерение зависимости локальной скорости имплантации $G(x)$ от глубины представляет собой большую проблему. Распределение имплантируемых ионов по длине пробега и, соответственно, скорость имплантации можно рассчитать с помощью кодов TRIDYN [15] или TRIM [16]. Покажем, однако, что для оценки вклада распыления нет необходимости в измерениях и расчетах скорости имплантации.

Предположим, что распределение ионов по длине пробега $G(x)$ и эффективность распыления S не меняются со временем. Если при этом учесть начальные условия $N(x,0) = 0$, то решением уравнения (1) является

$$N(x,t) = \int_0^t G(x + SF\tau) d\tau. \quad (3)$$

Отсюда получим временную зависимость удержанного флюенса

$$\Phi(t) = \int_0^{\infty} N(x,t) dx = \int_0^t d\tau \int_0^{\infty} G(x + SF\tau) dx. \quad (4)$$

Удержанный флюенс – это количество имплантированных атомов, оставшихся в облучаемой подложке, т.е. $F(t) \leq Ft$.

В результате конкуренции между накоплением имплантированных атомов и ионно-индуцированным распылением поверхности формируется стационарный концентрационный профиль

$$N(x,\infty) = \int_x^{\infty} G(x') dx' / SF. \quad (5)$$

Учитывая, что средний проективный пробег ионов в матрице можно представить в виде

$$R_p = \int_0^{\infty} xG(x) dx / \int_0^{\infty} G(x) dx = \int_0^{\infty} dx \int_x^{\infty} G(x') dx' / F = S \int_0^{\infty} N(x,\infty) dx, \quad (6)$$

из уравнения (4) следует, что максимальный удержанный флюенс не зависит от вида функции $G(x)$:

$$\Phi(\infty) = R_p / S. \quad (7)$$

Продемонстрируем это для двух предельных случаев. В первом случае примем, что пробег всех ионов в матрице одинаков:

$$G(x) = F\delta(x - R_p). \quad (8)$$

Тогда, используя выражение (4), получим

$$\Phi(t) = \begin{cases} Ft, & 0 \leq t \leq R_p / (SF); \\ R_p / S, & R_p / (SF) \leq t \leq \infty. \end{cases} \quad (9)$$

Во втором случае примем, что проективные пробеги ионов подчиняются равномерному распределению на интервале от 0 до $2R_p$:

$$G(x) = F \cdot \theta(2R_p - x) / (2R_p), \quad (10)$$

откуда следует

$$\Phi(t) = \begin{cases} F \cdot (t - SFt^2 / 4R_p), & 0 \leq t \leq 2R_p / (SF); \\ R_p / S, & 2R_p / (SF) \leq t \leq \infty. \end{cases} \quad (11)$$

Переход от одного предельного случая к другому приводит к увеличению времени насыщения от $R_p / (SF)$ до $2R_p / (SF)$. Время насыщения находится в указанном промежутке при других видах распределений $G(x)$, ограниченных областью координат от 0 до $2R_p$. Нижний предел соответствует эффективному времени насыщения

$$t_s = \Phi(\infty) / F = R_p / (SF). \quad (12)$$

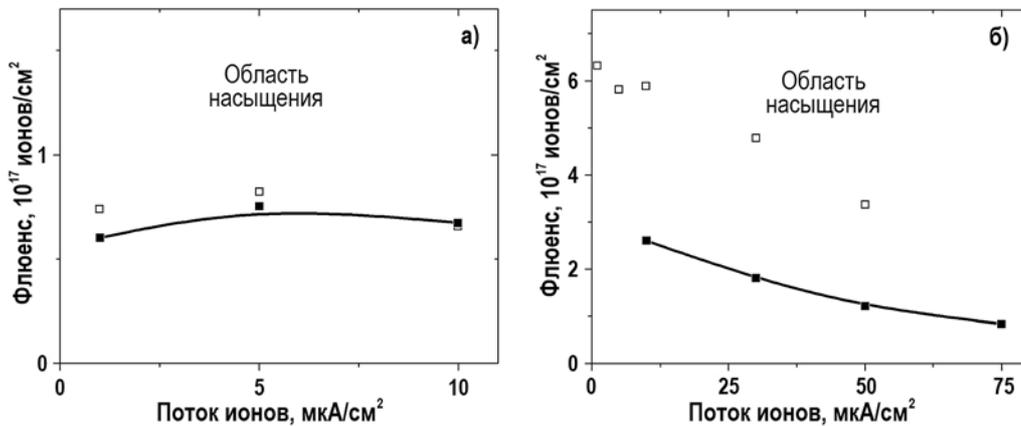


Рис. 2. Экспериментально измеренный флюенс ионов, соответствующий насыщению (черные квадраты), и рассчитанный максимальный флюенс ионов (светлые квадраты) для кварцевого стекла, имплантированного ионами Au⁻ (а) или Si⁻ (б) с энергией 60 кэВ при различных потоках ионов. Сплошные линии показаны для удобства восприятия

Проведенный анализ показывает, что вклад распыления поверхности в кинетику насыщения нанокompозитов можно оценить, используя неравновесные фазовые диаграммы, экспериментальные данные по скорости распыления поверхности и выражение (12) для эффективного времени насыщения. Для этого необходимо рассчитать максимальный флюенс ионов (R_p / S), при котором ожидается насыщение, и сравнить его со значением, полученным экспериментально. Расчеты хорошо согласуются с оптическими измерениями, проведенными во время имплантации кварце-

вого стекла ионами Au⁺ с энергией 60 кэВ (рис. 2а). При низких потоках ионов наблюдается небольшое превышение расчетных значений над экспериментальными данными. По-видимому, распыление идет настолько быстро, что изменения, связанные с другими процессами (рассмотрены далее), незначительно влияют на время насыщения.

В случае имплантации кварцевого стекла ионами Si⁺ с энергией 60 кэВ расчетный флюенс оказывается более чем в два раза выше измеренного экспериментально (рис. 2б). Для того чтобы расчет соответствовал эксперименту, необходима эффективность распыления в несколько раз выше, чем ее экспериментальные значения. Поэтому в дальнейшем не имеет смысла рассматривать возможную зависимость эффективности распыления от флюенса ионов, т.е. ее временную зависимость. Не соответствие расчета эксперименту следует связывать с изменением распределения имплантированной массы со временем облучения.

УМЕНЬШЕНИЕ ПРОБЕГА ИОНОВ

В предыдущем разделе мы предполагали, что распределение $G(x)$ не меняется со временем. Однако с ростом флюенса ионов происходит изменение химического состава и структуры имплантированного слоя, что приводит к изменению среднего проективного пробега ионов. Например, при имплантации кварцевого стекла ионами Si⁺ средний проективный пробег ионов уменьшается с ростом флюенса ионов. Согласно TRIM, в необлученном кварцевом стекле пробег ионов составляет 51 нм, а в сплошном слое меди он равен 19 нм. В нанокompозитах фаза металла всегда была представлена изолированными наночастицами меди, а сплошные слои меди отсутствовали, т.е. пробег ионов, уменьшаясь от исходного значения 51 нм, не достигал 19 нм.

С помощью формулы (12) был проведен расчет среднего пробега ионов Si⁺ с энергией 60 кэВ, соответствующего наблюдаемому времени насыщения при имплантации кварцевого стекла. В соответствии с расчетом необходимо, чтобы средний пробег ионов в конце облучения не превышал 22, 19 и 18 нм при плотности тока ионов 10, 30 и 50 мкА/см² соответственно. Таким образом, короткое время насыщения невозможно объяснить уменьшением пробега ионов, даже если предположить, что образуется сплошной слой меди.

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННАЯ ДИФфуЗИЯ

Кинетику насыщения при имплантации кварцевого стекла ионами Si⁺ с энергией 60 кэВ невозможно объяснить, учитывая только распыление поверхности. Рассмотрим влияние радиационно-стимулированной диффузии в имплантированном слое на насыщение нанокompозита.

Если диффузия и распыление учитываются одновременно, то в уравнение (1) следует добавить соответствующий член

$$\partial N(x,t) / \partial t = G(x) + SF \cdot \partial N(x,t) / \partial x + \partial^2 N(x,t) / \partial x^2, \quad (13)$$

где D – коэффициент диффузии.

В соответствии с уравнением (13) массоперенос из имплантированного слоя вглубь материала увеличивает время насыщения на величину порядка $D/(SF)^2$. Например, если считать, что распределение $G(x)$ не зависит от времени, а эффективность распыления S и коэффициент диффузии D – константы, то стационарный концентрационный профиль дается следующим выражением:

$$N(x, \infty) = \int_x^\infty e^{-SFx'/D} dx' \int_0^x e^{SFx''/D} G(x'') dx'' / D. \quad (14)$$

Интегрирование выражения (14) по координате в соответствии с формулой (4) дает следующий результат, не зависящий явно от $G(x)$:

$$t_s = \Phi(\infty) / F = R_p / (SF) + D / (SF)^2. \quad (15)$$

Чтобы окончательно выяснить, способна ли диффузия ускорить наступление насыщения, предположим, что при облучении диффузия протекает только в имплантированном слое. При достаточно быстрой диффузии ($D \gg SFR_p$) распределение имплантированных атомов в этом слое (на интервале от 0 до $2R_p$) оказывается равномерным в каждый момент времени, а изменение удержанного флюенса определяется потоком ионов и скоростью распыления:

$$d\Phi(t) / dt = F - SF \cdot \Phi(t) / (2R_p), \quad (16)$$

откуда следует, что диффузия и в этом случае увеличивает время насыщения:

$$t_s = 2R_p / (SF). \quad (17)$$

ВЫВОДЫ

Теоретический анализ кинетики формирования динамически устойчивых структур при имплантации кварцевого стекла ионами Au^- и Cu^- с энергией 60 кэВ выполнен на основании полученных ранее экспериментальных данных. Анализ проводился в рамках одномерной модели эволюции распределения имплантированных атомов по глубине, учитывающей распыление поверхности имплантированного слоя, производство и диффузию имплантированной массы.

Установлено, что в состоянии насыщения количество имплантированных атомов, оставшихся в облучаемой подложке (максимальный удержанный флюенс), не зависит от деталей распределения имплантируемых ионов по длине пробега. Максимальный удержанный флюенс определяется соотношениями между потоком имплантируемых ионов, проективным пробегом ионов, скоростью распыления поверхности и коэффициентом диффузии имплантированных атомов.

Предложен способ оценки вклада распыления поверхности в кинетику насыщения, основанный на расчете максимального удержанного флюенса из экспериментальных данных по скорости распыления и сравнении полученного расчетного значения со значением, измеренным экспериментально, например, при регистрации спектров оптического поглощения нанокомпозитов во время ионной имплантации.

Оценки, проведенные предложенным способом, показывают, что распыление поверхности доминирует в кинетике насыщения при имплантации кварцевого стекла ионами Au^- с энергией 60 кэВ. При имплантации кварцевого стекла ионами Cu^- с энергией 60 кэВ вклады распыления поверхности и диффузии имплантированной массы не являются доминирующими.

Литература

1. Haglund R.F. Ion implantation as a tool in the synthesis of practical third-order nonlinear optical materials // Materials Science and Engineering A. - 1998. - Vol. 253. - PP. 275-283.
2. Maier S.A., Brongersma M.L., Kik P.G., Meltzer S., Requicha A.A.G., Atwater H.A. Plasmonics – a route to nanoscale optical devices // Advanced Materials. - 2001. - Vol. 13. - PP.1501-1505
3. Hutter E., Fendler J.H. Exploitation of localized surface plasmon resonance // Advanced Materials. - 2004. - Vol. 16. - PP. 1685-1706.
4. Grigorenko A.N., Geim A.K., Gleeson H.F., Zhang Y., Firsov A.A., Khrushchev I.Y., Petrovic J. Nanofabricated media with negative permeability at visible frequencies // Nature. - 2005. - Vol. 438. - PP. 335-338
5. Kishimoto N., Takeda Y., Umeda N., Okubo N., Faulkner R.G. Ion-induced metal nanoparticles in insulators for nonlinear optical property // Nuclear Instruments and

Methods.- 2003.- Vol. 206.- PP.634-638.

6. Amekura H., Kishimoto N. Fabrication of oxide nanoparticles by ion implantation and thermal oxidation / Toward Functional Materials, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology, Ed. by Z.M. Wang, Springer Science + Business Media, 2009.

7. Plaksin O.A., Takeda Y., Amekura H., Kishimoto N. Electronic excitation and optical responses of metal-nanoparticle composites under heavy-ion implantation // Journal of Applied Physics.- 2006.- Vol. 99. - P. 044307-1-10.

8. Plaksin O. A., Takeda Y., Amekura H., Kishimoto N. Radiation-induced differential optical absorption of metal nanoparticles // Applied Physics Letters.- 2006.- Vol. 88.- P. 201915-1-3.

9. Plaksin O.A., Takeda Y., Umeda N., Kono K., Amekura H., Kishimoto N. Ion-induced optical response of nanocomposites in sapphire // Nuclear Instruments and Methods B.- 2006.- Vol. 242.- PP. 118-120.

10. Plaksin O.A., Takeda Y., Amekura H., Kono K., Kishimoto N. Stability of metal nanocomposites under heavy-ion bombardment of insulators // Nuclear Instruments and Methods B.- 2006.- Vol. 250. - PP. 220-224.

11. Plaksin O.A., Kono K., Takeda Y., Plaksin S.O., Shur V.Ya., Kishimoto N. Dynamic stability of metal-nanocluster composites based on LiNbO_3 under heavy-ion bombardment // Ferroelectrics.- 2008.- Vol. 373. - PP. 127-132.

12. Plaksin O.A., Takeda Y., Kono K., Amekura H., Kishimoto N. Radiation photonics: A case of metal-nanoparticle composites // Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials.- 2010.- Vol. 19/4. - PP. 737-744.

13. Plaksin O.A., Stepanov V.A., Shikama T., Takeda Y., Kishimoto N. Optical diagnostics of collective and non-linear effects in insulators during intense irradiation // Journal of Nuclear Materials.- 2011.- Vol. 417. - PP. 806-809.

14. Kishimoto N., Takeda Y., Umeda N., Lee C.G., Amekura H., Lay T.T., Okubo N., Gritsyna V.T. Metal nanoparticle structures controlled with ion-induced kinetics // Proc. of the 5th International Symposium on Advanced Physical Fields. - National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan, March 6-9, 2000.- PP. 123-156.

15. Ziegler J.F., Biersack J.P. The stopping and range of ions in solids.- Pergamon Press, New York, 1985.

16. TRIDYN Vs. 4.0 by W. Müller and W. Eckstein. Department of Surface Physics, Max-Planck Institute of Plasma Physics, Garching, Germany, 1989.

Поступила в редакцию 11.11.2015 г.

Автор

Плаксин Олег Анатольевич, профессор кафедры материаловедения

Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ

E-mail: plax@mail.ru

UDC 539.1.043

DYNAMICALLY STABLE NANOSTRUCTURES IN HEAVY-ION IMPLANTED SILICA GLASS

Plaksin O.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering
National Nuclear Research University «МЭФТИ»
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

Search and characterization of the structures stable under irradiation are critical issues of radiation materials science, in particular, it is so in respect to radiation resistance of the structure materials and diagnostic-system materials necessary in nuclear engineering. Optical measurements during heavy-ion implantation of insulators allow researchers to find the states of structure that are dynamically stable under irradiation. In this paper consisting of two chapters, previously reported experimental data have been used for kinetic analysis of the dynamically stable structure formation under implantation of 60 keV Au⁻ or Cu⁻ ions into silica glass. The kinetics has been analyzed in the frame of the one-dimensional model of evolution of the implant depth distribution, with taking into account the surface recession due to sputtering, as is also, with considering the local implant production, drift and diffusion.

The kinetic analysis has shown that the maximum number of implanted atoms retained in the irradiated substrate (maximum retained ion fluence) is independent of detailed ion-range distribution. The maximum retained ion fluence depends on ratios between the following quantities: the ion flux, the mean projectile range, the surface recession rate, the implant drift velocity and the implant diffusion coefficient. In the first chapter, a method has been proposed for evaluation of the surface recession's role in the saturation kinetics. In this method, the maximum retained ion fluence is calculated from experimental data on surface recession, and then the calculated result is compared to the ion fluence corresponding to the observed saturation. Estimations conducted for 60 keV Au⁻ ion implantation of silica glass have shown that the surface recession predominates in the saturation kinetics.

Surface recession does not dominate for 60 keV Cu⁻ ion implantation of silica glass. Formation of dynamically stable structures during 60 keV Cu⁻ ion implantation of silica glass cannot be explained if the drift of implants is excluded from considerations. Considerations in the second chapter have shown that the drift's contribution increases with increasing the ion flux. A mechanism of depleted region formation in the dynamically stable structures has been demonstrated. According to this mechanism, formation of a depleted region within the implanted layer is caused by expelling effect of electric field from the region where the electric field is zero. Necessary drift velocity is provided by Cu⁺ solutes. A method utilizing images of the dynamically stable structures has been proposed for evaluation of the implant drift's role in the saturation kinetics.

Keywords: heavy-ion implantation, radiation-induced processes, nanostructures, radiation resistance

REFERENCES

1. Haglund R.F. Ion implantation as a tool in the synthesis of practical third-order nonlinear optical materials. *Materials Science and Engineering A*. 1998, v. 253, pp. 275-283.
2. Maier S.A., Brongersma M.L., Kik P.G., Meltzer S., Requicha A.A.G., Atwater H.A. Plasmonics – a

- route to nanoscale optical devices. *Advanced Materials*. 2001, v. 13, pp. 1501-1505.
3. Hutter E., Fendler J.H. Exploitation of localized surface plasmon resonance. *Advanced Materials*. 2004, v. 16, pp. 1685-1706.
4. Grigorenko A.N., Geim A.K., Gleeson H.F., Zhang Y., Firsov A.A., Khrushchev I.Y., Petrovic J. Nanofabricated media with negative permeability at visible frequencies. *Nature*. 2005, v. 438, pp. 335-338.
5. Kishimoto N., Takeda Y., Umeda N., Okubo N., Faulkner R.G. Ion-induced metal nanoparticles in insulators for nonlinear optical property. *Nuclear Instruments and Methods*. 2003, v. 206, pp. 634-638.
6. Amekura H., Kishimoto N. Fabrication of oxide nanoparticles by ion implantation and thermal oxidation. *Toward Functional Materials, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*, Ed. by Z.M. Wang, Springer Science+Business Media, 2009.
7. Plaksin O.A., Takeda Y., Amekura H., Kishimoto N. Electronic excitation and optical responses of metal-nanoparticle composites under heavy-ion implantation. *Journal of Applied Physics*. 2006, v. 99, p. 044307-1-10.
8. Plaksin O. A., Takeda Y., Amekura H., Kishimoto N. Radiation-induced differential optical absorption of metal nanoparticles. *Applied Physics Letters*. 2006, v. 88, p. 201915-1-3.
9. Plaksin O.A., Takeda Y., Umeda N., Kono K., Amekura H., Kishimoto N. Ion-induced optical response of nanocomposites in sapphire. *Nuclear Instruments and Methods B*. 2006, v. 242, pp. 118-120.
10. Plaksin O.A., Takeda Y., Amekura H., Kono K., Kishimoto N. Stability of metal nanocomposites under heavy-ion bombardment of insulators. *Nuclear Instruments and Methods B*. 2006, v. 250, pp. 220-224.
11. Plaksin O.A., Kono K., Takeda Y., Plaksin S.O., Shur V.Ya., Kishimoto N. Dynamic stability of metal-nanocluster composites based on LiNbO_3 under heavy-ion bombardment. *Ferroelectrics*. 2008, v. 373, pp. 127-132.
12. Plaksin O.A., Takeda Y., Kono K., Amekura H., Kishimoto N. Radiation photonics: A case of metal-nanoparticle composites. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*. 2010, v. 19/4, pp. 737-744.
13. Plaksin O.A., Stepanov V.A., Shikama T., Takeda Y., Kishimoto N. Optical diagnostics of collective and non-linear effects in insulators during intense irradiation. *Journal of Nuclear Materials*. 2011, v. 417, pp. 806-809.
14. Kishimoto N., Takeda Y., Umeda N., Lee C.G., Amekura H., Lay T.T., Okubo N., Gritsyna V.T. Metal nanoparticle structures controlled with ion-induced kinetics. Proc. of the 5th International Symposium on Advanced Physical Fields. National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan, March 6-9, 2000, pp. 123-156.
15. Ziegler J.F., Biersack J.P. The stopping and range of ions in solids. Pergamon Press, New York, 1985.
16. TRIDYN Vs. 4.0 by W. Moller and W. Eckstein. Department of Surface Physics, Max-Planck Institute of Plasma Physics, Garching, Germany, 1989.

Author

Plaksin Oleg Anatol'evich, Professor, Department of Materials Science
Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering,
National Research Nuclear University «MEPhI»
E-mail: plax@mail.ru