ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР

FEATURES OF CONTROL OF SILICON NANOSTRUCTURES TECHNOLOGY

УДК 54-1, ВАК 05.27.01, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.76.5.36.51

Н.Герасименко^{1,2}, А.Волоховский^{1,3}, О.Запорожан¹ / rmta@miee.ru
N.Gerasimenko^{1,2}, A.Volokhovskiy^{1,3}, O.Zaporozhan¹

Рассматривая технологический процесс производства кремниевых наноструктур, важно учитывать их переход в состояние размерного квантования, сопровождаемый изменением их механических и структурных свойств. Особенности, связанные с принципиальным изменением свойств материала, были рассмотрены нами в работе [1]. Эти эффекты также необходимо учитывать при разработке системы контроля технологического процесса производства приборов и систем, содержащих наноразмерные структуры. В данной работе рассматриваются новые требования к контролю технологических процессов, в том числе предъявляемые к оборудованию, с помощью которого осуществляется этот контроль.

Considering the process for the production of silicon nanostructures, it is important to take into account their transition to the state of dimensional quantization accompanied by a change in their mechanical and structural properties. Features related to the fundamental change in the properties of the material were considered by us in [1]. These effects also need to be taken into account when developing a process control system for the production of devices and systems containing nanoscale structures. In this paper, we consider new requirements for the process control, including those for the equipment with use of which this control is carried out.

Понятие "технологический контроль" объединяет две составляющие: организацию контрольного процесса и непосредственно измерительные методики, включая финальные операции контроля параметров изделия. С организационной точки зрения процесс контроля должен отвечать следующим требованиям:

- точность и воспроизводимость получаемого результата;
- оперативность получения результата;
- высокая производительность;
- высокая степень автоматизации;
- безопасность применения методики и оборудования, на котором она реализована;
- высокая степень достоверности получаемого результата.

Эти требования накладывают ограничения как на применяемые в процессе оперативного технологического контроля методики, так и на оборудование, на котором они реализованы. В производстве наноразмерных изделий для удовлетворения данных требований необходим учет следующих обстоятельств:

- изменения механических свойств объектов и структур при проведении контрольных операций, а также влияния поверхностей и границ разделов, изменения структурных свойств, которые рассматривались в статье [1];
- повторный контроль параметров объектов и структур при проведении последующих операций;
- влияние диффузионных процессов, размытие границ раздела материалов;

¹ Национальный исследовательский университет МИЭТ (Москва) / National Research University of Electronic Technology MIET (Moscow)

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва) / Lebedev Physical Institute RAS (Moscow)

³ АО "Ангстрем-Т" (Москва) / Angstrom-T (Moscow)

- влияние приграничных областей наноразмерного объекта;
- снижение степени воздействия на образец при проведении контрольных мероприятий;
- повышение комплексности получаемого результата, в смысле увеличения числа одновременно определяемых параметров.

Необходимость учета такого широкого круга факторов при построении операций технологического контроля вынуждает разрабатывать новые методики контроля, так как традиционно применяемые методики, даже хорошо разработанные, перестают удовлетворять предъявляемым требованиям, которые меняются по мере развития технологии.

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

В качестве первого примера рассмотрим методику эллипсометрии [2], классически применяемую для технологического контроля толщин тонких пленок. Эта методика обладает рядом важных

качеств, среди которых: высокая точность и воспроизводимость результата, высокая производительность, малая степень воздействия на образец. Однако, по мере развития технологии для некоторых процессов даже эллипсометрия перестает удовлетворять требованиям к контрольным операциям.

Рассмотрим процесс контроля подзатворного диэлектрика МОП-транзистора и происходящие с развитием технологии производства СБИС изменения. Исторически в качестве подзатворного диэлектрика в КМОП-технологии использовался оксид кремния. По мере развития технологии для обеспечения уменьшения длины канала затвора потребовалось уменьшить и толщину слоя диэлектрика. Когда его требуемая толщина приблизилась к значению 1 нм, рост паразитных эффектов заставил переходить на новые материалы. Среди этих эффектов можно выделить, во-первых, обеднение затвора, туннелирование носителей в затвор,

The concept of technological control combines two components: the organization of the control process and directly measurement techniques, including the final operations of monitoring the parameters of the product. From an organizational point of view, the control process must meet the following requirements:

- accuracy and reproducibility of the result;
- efficiency of obtaining the result;
- high performance;
- high degree of automation;
- safety of application of the methodology and equipment on which it is implemented;
- high degree of reliability of the result obtained.

These requirements impose limitations on both the techniques used in the operational process control and the equipment on which they are implemented. In the production of nanoscale products to meet these

requirements, it is necessary to take into account the following circumstances:

- changes in the mechanical properties of objects and structures during control operations, as well as the effect of surfaces and interphase boundary, changes in the structural properties that were considered in the paper [1];
- repeated control of the parameters of objects and structures during subsequent operations;
- influence of diffusion processes, blurring of material interfaces;
- impact of boundary regions of a nanoscale object;
- reduction of the degree of impact on the sample during the control measures;
- increasing the complexity of the result obtained, in the sense of increasing the number of simultaneously determined parameters.

The need to take into account such a wide range of factors in the construction of technological

control operations forces us to develop new control methods, since the conventional methods, even those that are well developed, cease to meet the requirements, which change as technology develops.

CONTROL OF THIN FILM PROCESSES

As a first example, let us consider the ellipsometry technique [2], classically used for technological control of thin film thicknesses. This technique has a number of important qualities, including: high accuracy and reproducibility of the result, high performance, low impact on the sample. However, with the development of technology, for some processes even ellipsometry ceases to meet the requirements for control operations.

Let's consider the process of the gate dielectric control of the MOSFET and the changes that occur with the development of VLSI production technology. Historically, silicon oxide was

что приводит к росту тока утечки, и, во-вторых, диффузию легирующей примеси (такой как бор [3]) из затвора в канал, что также приводит к деградации свойств получаемых микросхем. Поэтому, начиная с технологического уровня 90 нм, в подзатворный диэлектрик начали в небольших количествах (около 10% масс.) вводить азот. Это позволяет как предотвратить диффузию бора [3], так и повысить коэффициент диэлектрической проницаемости пленки. На последующих уровнях КМОП-технологии начался переход на так называемые high-K-материалы, такие как силикат и оксид гафния. Таким образом, контроль процессов получения подзатворного диэлектрика должен включать не только измерение толщин этих пленок, но также и определение их состава, чего можно достичь с применением комплексного подхода, предполагающего одновременный контроль толщины и показателя преломления пленок.

С помощью классических лазерных эллипсометров с вращающимся поляризатором, анализатором или компенсатором, традиционно применяемых для технологического контроля тонких пленок с субангстремной воспроизводимостью [4], возможно лишь измерение оптической толщины пленок, то есть произведения толщины на показатель преломления. Эта проблема традиционно решалась с помощью перехода к спектральной или угловой эллипсометрии [5, 6], позволяющей фиксировать значения эллипсометрических величин для диапазона

спектра или углов падения соответственно, и таким образом позволяющей одновременно определять более одного независимого параметра, то есть и толщину пленки, и ее оптические свойства.

Однако, для таких процессов как формирование подзатворного диэлектрика, в которых допустимый технологический разброс толщины слоя не должен превышать 1-2 ангстрема, метод спектральной эллипсометрии (СЭ) [7] при одновременном контроле толщины и оптических свойств обладает недостаточной точностью. Это связано с тем, что регистрация значений эллипсометрических величин даже для широкого участка спектра не позволяет полностью избавиться от взаимных корреляций параметров при нахождении результата численными методами и, следовательно, не позволяет устранить неоднозначность полностью, так как значения эллипсометрических углов для разных участков спектра не являются полностью независимыми величинами.

Устранить подобные неоднозначности позволяет переход на комплексные методы измерения, где несколько отдельных методик взаимно дополняют друг друга для нахождения достоверного результата. Такой контрольный процесс для подзатворных high-K-диэлектриков на базе комбинации нескольких оптических методик в единый цикл обработки данных рассматривается в работе [8]. В работах [9, 10] обсуждается проблема точного экспериментального

used as the gate dielectric in CMOS technology. As the technology developed, to reduce the length of the shutter channel, it was also necessary to reduce the thickness of the dielectric layer. When its required thickness approached 1 nm, the growth of parasitic effects made it necessary to switch to new materials. Among these effects, one can distinguish, firstly, the depletion of the gate, the tunneling of carriers into the shutter, which leads to an increase in the leakage current, and, secondly, the diffusion of the dopant (such as boron [3]) from the gate to the channel,

which also leads to degradation of properties of the IC. Therefore, starting from the 90 nm technological level, nitrogen was introduced into the gate insulator in small amounts (about 10% by weight). This allows both to prevent diffusion of boron [3] and to increase the dielectric constant of the film. At subsequent levels of CMOS technology, the transition to so-called high-k materials began, such as hafnium silicate and hafnium oxide. Thus, the control of the processes of obtaining a gate dielectric must include not only the measurement of the thicknesses of these films,

but also the determination of their composition, which can be achieved with the use of an integrated approach involving simultaneous control of the thickness and refractive index of the films.

With the help of classical laser ellipsometers with a rotating polarizer, analyzer or compensator, traditionally used for control of thin films with sub-angstrom reproducibility [4], it is only possible to measure the optical thickness of films, that is, the product of the thickness by the refractive index. This problem has traditionally been solved with the help of a transition to spectral or

определения оптических свойств тонких пленок в широком диапазоне спектра (190–800 нм) при применении таких методик как эллипсометрия, спектрофотометрия и скаттерометрия к объектам современной технологии. Традиционно для этого используется метод СЭ [11, 12], однако с уменьшением абсолютного значения толщины контролируемых слоев до значений менее 10 нм необходимо применение перекрестного контроля, так как точность СЭ оказывается недостаточной [9]. Найденное значение затем используется в эллипсометрии для определения оптических свойств пленки. В качестве такого перекрестного метода контроля авторами работ [8, 9], выполненных независимыми коллективами авторов, предлагается рентгеновская рефлектометрия (РР) [13, 14], которая имеет отличную чувствительность к тонким пленкам, является неразрушающей и, что очень важно, не требует калибровки на внешние стандарты.

Такой взаимодополняющий принцип построения измерительных методик может также применяться при контроле многокомпонентных пленок и пленок сложного состава. Например, рассмотрим контроль процесса получения пленок фторсодержащего силикатного стекла. В этом случае, для контроля толщины с удовлетворительной точностью обязательно одновременное измерение показателя преломления, так как оптические свойства данной пленки, определяемые ее составом

(а именно, содержанием фтора), могут изменяться при последовательных реализациях процесса нанесения. Для одновременного определения толщины и оптических свойств этих пленок применялась методика СЭ [5]. Добавление в эту схему контроля проверки состава пленки методом рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (РФС) позволило выявить закономерность, представленную на рис.1. Таким образом, оказалось возможным использовать методику СЭ для оперативной оценки состава данных пленок по изменению их оптических характеристик.

Представленная зависимость также дает возможность увеличить точность определения толщины подобных пленок. В этом случае с помощью РФС определяется концентрация фтора в пленке, которая затем пересчитывается в показатель преломления, используемый в СЭ в качестве фиксированного значения. Это позволяет исключить влияние присущей СЭ корреляции "оптические свойства – толщина" и увеличить точность определения толщины в 2–3 раза.

КОНТРОЛЬ ЛАТЕРАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Следующим примером может являться процесс контроля латеральных размеров элементов, получаемых с помощью фотолитографии и травления. Традиционно для этого применялась растровая электронная микроскопия (РЭМ).

angular ellipsometry [5, 6], which allows to register ellipsometric values for the spectral range or angles of incidence, respectively, and thus allows simultaneously to determine more than one independent parameter, that is, the film thickness, and its optical properties.

However, for such processes as the formation of a gate insulator in which the allowable technological spread of the layer thickness should not exceed 1–2 angstroms, the method of spectral ellipsometry (SE) [7] with simultaneous control of thickness and optical properties is

insufficiently accurate. This is due to the fact that recording the values of ellipsometric quantities even for a wide spectral region does not completely eliminate mutual correlations of the parameters when finding the result by numerical methods, and, therefore, does not allow to eliminate ambiguity completely, since the values of ellipsometric angles for different parts of the spectrum are not completely independent quantities.

The use of complex measurement methods, where several separate techniques complement each other in order to find

a reliable result, allows such ambiguities to be eliminated. Such a control process for high-k gate dielectrics based on a combination of several optical techniques in a single data processing cycle is considered in [8]. The problem of the exact experimental determination of the optical properties of thin films over a wide range of the spectrum (190–800 nm) using such techniques as ellipsometry, spectrophotometry and scatterometry to objects of modern technology is discussed in [9, 10]. Traditionally, the SE method [11, 12] is used for this purpose, however, when the

Рис.1. Зависимость показателя преломления пленки фторсодержащего силикатного стекла (для $\lambda = 633$ нм) измеренного методом спектральной эллипсометрии от концентрации фтора в этом образце, измеренной методом рентген-флуоресцентной спектроскопии

Fig.1. Dependence of refractive index of fluorine-containing silicate glass film (for $\lambda = 633$ nm) measured by spectral ellipsometry on concentration of fluorine in sample measured by X-ray fluorescence spectroscopy

По мере развития технологии фотолитографии для увеличения разрешающей способности процессов формирования структур был произведен переход на экспонирование на длине волны 193 нм с использованием эксимерных лазеров (ArF). Это повлекло за собой разработку новых фоторезистов, обладающих соответствующими

Рис.2. РЭМ-изображение затворов в КМОП-технологии 90 нм, полученное сразу после операции травления поликремния. Отмечен размер структуры, полученный при измерении по верхнему и по нижнему основаниям. Угол наклона стенки – 89,25°. Масштабная линейка – 200 нм

Fig.2. SEM image of gates in 90 nm CMOS technology obtained immediately after etching of polysilicon. Size of structure obtained by measuring at upper and lower bases is marked. Angle of inclination of wall is 89.25°. Scale ruler – 200 nm

absolute value of the thickness of the controlled layers decreases less than 10 nm, the use of cross-checking is necessary, since the accuracy of the SE is insufficient [9]. The value found is then used in ellipsometry to determine the optical properties of the film. X-ray reflectometry (XRR) [13, 14], which has excellent sensitivity to thin films, is non-destructive and does not require calibration to external standards, is proposed as such a cross-checking method by independent teams of the authors of [8, 9].

Such a complementary principle for the construction of

measuring techniques can also be used in the control of multi-component films and films of complex composition. For example, one can consider the control of the obtaining films of fluorine-containing silicate glass. In this case, simultaneous measurement of the refractive index is necessary to control the thickness with satisfactory accuracy, since the optical properties of this film, determined by its composition (namely, by the fluorine content), can change with successive implementation of the deposition. For simultaneous determination of the thickness and

свойствами (так называемых "химически-усиленных фоторезистов"). Однако, при измерении размеров фоторезистивных линий или зазоров между такими линиями методами РЭМ наблюдается эффект "сгорания" материала, который заключается в уменьшении наблюдаемого размера линии или увеличении зазора

optical properties of these films, the SE technique was used [5]. The addition of X-ray fluorescence spectroscopy (XRFS) to this control scheme allows to reveal the dependence presented in Fig.1. Thus, it was possible to use the SE technique for the rapid evaluation of the composition of these films by changing their optical characteristics.

The presented dependence also makes it possible to increase the accuracy of determining the thickness of such films. In this case, the XRFS determines the concentration of fluorine in the film, which is then recalculated

Рис.3. Принципиальная оптическая схема, используемая для скаттерометрических измерений

Fig.3. Principal optical scheme for scatterometry

в результате зондирования образца. Согласно модельным представлениям, величина уменьшения фоторезистивной линии пропорциональна дозе облучения резиста электронами. Для 193-нм резистов при однократном сканировании фоторезистивной линии с номинальным размером около 100 нм это уменьшение достигает 3–10 нм [15] за одно измерение. На эффект влияют увеличение и ускоряющее напряжение, но он наблюдается даже при таких низких значениях ускоряющих напряжений как 300 В [16]. Дальнейшее снижение ускоряющего напряжения в РЭМ ведет к резкой деградации контраста изображения [15]. Таким образом,

непосредственно сама измерительная методика вносит ошибку в результат измерения.

Для КМОП-технологии 120 нм аспектное соотношение толщины и длины затвора транзистора перешагнуло пороговое значение, составляющее единицу. Для этого технологического уровня необходимая воспроизводимость измерения критических размеров составляет 1,8 нм [16]. В структуре затвора, имеющего аспектное соотношение 1:1, отклонение угла наклона стенки на 1° приведет к изменению наблюдаемого размера, измеренного по верху и низу затвора, более чем на 10% от допустимого отклонения процесса (рис.2). Таким образом, необходимо не

into the refractive index used in the SE as a fixed value. This allows to exclude the influence of the correlation of "optical properties – thickness", and to increase the accuracy of determining the thickness by 2–3 times.

CONTROL OF LATERAL SIZES OF FORMED ELEMENTS

The next example may be the control of the lateral dimensions of the elements obtained by photolithography and etching. Traditionally, for this purpose, scanning electron microscopy (SEM) was used. With the development of photolithography, the

transition to exposure at 193 nm using excimer lasers (ArF) was performed to increase the resolution of the structure formation processes. This entailed the development of new photoresists with the corresponding properties (the so-called "chemically-enhanced photoresists"). However, when measuring the dimensions of photoresist lines or gaps between such lines by SEM methods, the effect of "burning" is observed, which consists in decreasing the observed line size or increasing the gap as a result of probing the sample. According to modeling, the reduction in the size of

photoresist line is proportional to the dose of irradiation of the resist by electrons. For 193 nm resistors, with a single scan of a photoresist line with a nominal size of about 100 nm, this decrease reaches 3–10 nm [15] in one measurement. The effect is affected by the magnification and accelerating voltage, but it is observed even at such low values of accelerating voltages as 300 V [16]. Further reduction of the accelerating voltage in the SEM leads to a sharp degradation of the image contrast [15]. Thus, the measuring method itself makes an error in the measurement result.

Рис. 4. Блок-схема восстановления пространственного профиля структуры по методу оптической скаттерометрии
Fig. 4. Block-scheme for reconstructing spatial profile of structure by optical scatterometry

только измерять критический размер полученного затвора с требуемой воспроизводимостью, но и точно знать, на какой высоте происходит измерение. Для этого требуется методика, позволяющая производить измерение полного профиля получаемой трехмерной структуры элементов, включая определение их латеральных размеров, толщин и угла наклона стенок. Этого можно достичь с переходом на дифракционные

оптические методики измерения критических размеров, такие как скаттерометрия [17] (рис. 3 и 4).

В мировой практике современной микроэлектроники оптическая скаттерометрия используется в качестве стандартного метода контроля процессов формирования трехмерных структур. В частности, скаттерометрия активно применяется для контроля

For 120 nm CMOS technology, the aspect ratio of the thickness and length of the gate of the transistor exceeded the threshold value, which was equal to one. For this technological level, the required reproducibility of measurement of critical dimensions is 1.8 nm [16]. In the structure of the gate having an aspect ratio of 1:1, the deviation of the angle of the wall by 1° will lead to a change in the observed size, measured from the top and bottom of the shutter, by more than 10% of the permissible deviation of the process (Fig. 2). Thus, it is necessary not only to measure the

critical size of the obtained shutter with the required reproducibility, but also to know precisely at what height the measurement takes place. To this end, a technique is required that makes it possible to measure the overall profile of the resulting three-dimensional structure of elements, including the determination of their lateral dimensions, thicknesses, and the angle of inclination of the walls. This can be achieved with the transition to diffraction optical techniques for measuring critical dimensions, such as scatterometry [17] (Fig. 3 and 4).

In the practice of modern microelectronics, optical scatterometry is used as a standard method for controlling the formation of three-dimensional structures. In particular, scatterometry is actively used to control critical dimensions in photolithographic [18] and etching processes [17, 19]. This technique allows one to analyze diffraction patterns from periodic structures in order to restore their spatial profiles. In this case, it is possible not only to measure the lateral dimensions of periodic structures, but also the depth of the grooves of etching, the slope of their walls. In

критических размеров в фотолитографических процессах [18] и процессах травления [17, 19]. Эта методика позволяет анализировать картины дифракции от периодических структур с целью восстановления их пространственных профилей. При этом возможно не только измерение латеральных размеров периодических структур, но одновременно и глубины канавок травления, наклона их стенок. В мировой практике скаттерометрия получила широкое распространение при переходе на малые топологические нормы [19, 21], так как позволяет заменить сразу несколько традиционных средств контроля, а также обладает высокой производительностью и точностью [20]. Методика успешно применяется на технологических уровнях вплоть до 20 нм [20, 21], причем влияние шероховатостей границ элементов на результат изучено [18, 22] и может быть учтено.

Однако, успешное внедрение скаттерометрии в каждом технологическом случае требует проведения комплексного исследования структуры перекрестными методами. Подобное исследование, позволившее внедрить данную методику для контроля технологического процесса травления щелевой изоляции, подробно описывалось нами в работе [23]. Используемый в этом исследовании скаттерометр может применяться для контроля критических размеров вплоть до технологического уровня 45 нм. Это связано с тем, что его спектральный диапазон 250–800 нм ограничен использованным

источником (ксеноновая лампа), а также характеристиками пропускания оптических элементов. Техника оптической скаттерометрии для меньших проектных норм может быть реализована за счет перехода в часть спектра с меньшей длиной волны с использованием дейтериевого источника, имеющего типичный спектральный диапазон 150–400 нм. Такая установка позволит проводить контроль критических размеров вплоть до технологии 22 нм [13].

Дальнейшее смещение используемого спектрального диапазона для оптических скаттерометров представляется проблематичным, так как потребует вакуумирования оптического тракта, использования сверхчистого азота для его постоянной продувки, либо других технических решений, которые приведут к резкому росту стоимости установки и затрат на ее эксплуатацию. Поэтому в настоящее время ведущие мировые производители метрологического оборудования проводят разработку рентгеновских средств измерения критических размеров. Примером может являться установка для измерения критических размеров посредством анализа картин малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (CD-SAXS), которая в настоящее время разрабатывается японской компанией Rigaku [24]. Эта установка предназначена для использования на технологических уровнях 10 нм и ниже. Другой группой исследователей в настоящее время ведется разработка установки скаттерометрии, работающей

the world practice, the scatterometry has become widely used in the transition to small design rules [19, 21], since it allows the replacement of several traditional means of control, and also has high performance and accuracy [20]. The technique is successfully applied at technological levels up to 20 nm [20, 21], and the effect of the roughness of the element boundaries on the result has been studied [18, 22] and can be taken into account.

However, the successful introduction of scatterometry in each technological case requires a comprehensive study of the

structure by cross methods. Such a study, which made it possible to introduce this technique to control the etching of gap insulation, was described in detail in [23]. The scatterometer used in this study can be used to measure critical dimensions up to a design rule of 45 nm. This is due to the fact that its spectral range of 250–800 nm is limited by the source used (xenon lamp), as well as by the transmission characteristics of optical elements. The technique of optical scatterometry for smaller design rules can be realized by switching to a part of the spectrum with a shorter

wavelength using a deuterium source having a typical spectral range of 150–400 nm. Such an installation will allow monitoring of critical dimensions down to 22 nm [13].

Further shift of the spectral range of optical scatterometers is problematic, since it will require vacuumation of the optical path, the use of ultrapure nitrogen for its constant purging, or other technical solutions that will lead to a sharp increase in the cost of the equipment and the cost of its operation. Therefore, leading world manufacturers of metrological equipment are developing

на фокусированных ионных пучках (ФИП) [25]. Такой подход позволяет определить не только пространственную геометрию исследуемой периодической структуры, но и профиль распределения химических элементов в ней. Это необходимо для оперативного контроля распределения легирующих примесей на вертикальных стенках структуры, что важно в современной КМОП-технологии при формировании так называемых FinFET транзисторных структур.

Первые опыты, описанные в работах [24, 25], указывают, что для контроля как наиболее малоразмерных, так и других элементов ИС необходимо сочетание оптической и рентгеновской или ионной методик, возможности и ограничения которых должны быть исследованы дополнительно. В этой связи следует напомнить о необходимости снижения степени воздействия на образец, с которой мы и начали рассмотрение методики оптической скаттерометрии. При переходе в скаттерометрии на рентгеновский диапазон требуется учет многих факторов, которые могут сделать применение методики в технологическом цикле затруднительным или невозможным. Следует учитывать образование радиационных дефектов, негативное воздействие на слои фоторезиста и нижележащие слои. При переходе к ФИП номенклатура паразитных эффектов еще более увеличивается. Воздействие ФИП на структуру материала стало предметом обсуждения

на недавней конференции ConFab-2017 [26] и в одном из последних номеров журнала SolidState Technology [27], а также рассматривались в недавних работах как зарубежными коллективами авторов [28], так и нами [29].

КОНТРОЛЬ ВЕЛИЧИН РАЗМЫТИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА

Важной особенностью, которую необходимо учитывать при контроле наноразмерных структур, является размытие границ разделов материалов, наступающее при их взаимной диффузии. При снижении абсолютных значений размеров элементов относительный вклад данных эффектов растет. Причем в некоторых случаях они могут приводить к полной потере функциональных свойств структуры и, как следствие, к полному выходу изделия из строя. Примером такого случая может являться диффузионно-барьерная структура, применяющаяся в технологии медной металлизации Damascene. В ней используется двойная структура на основе тантала и его нитрида. Свойства данных ДБС-структур, а также причины, по которым в технологическом цикле медной металлизации выбор пал именно на них, подробно описаны в [30, 31] и других работах. Для наших целей необходимо лишь упомянуть функциональное назначение каждого из слоев в данной структуре: TaN обеспечивает адгезию к межслойному диэлектрику (как к окислу, так и к low-k-диэлектрикам), имеет удовлетворительные диффузионно-барьерные свойства, а также

X-ray devices for measuring critical dimensions. An example would be a system for measuring critical dimensions by analyzing critical-dimension small-angle X-ray scattering (CD-SAXS), which is currently being developed by the Japanese company Rigaku [24]. This unit is designed for use at design rules of 10 nm or lower. Another group of researchers is currently developing a scatterometer operating on focused ion beams (FIB) [25]. This approach allows us to determine not only the spatial geometry of the periodic structure under study, but also the distribution

profile of the chemical elements in it. This is necessary for the operational control of the distribution of doping impurities on the vertical walls of the structure, which is important in modern CMOS technology in the formation of so-called FinFET transistor structures.

The first experiments described in [24, 25] indicate that the control of both the smallest and the other IC elements requires a combination of optical and X-ray or ionic techniques, the possibilities and limitations of which must be investigated additionally. In this connection, it should

be recalled that it is necessary to reduce the degree of influence on the sample, with which we began our examination of the optical scatterometry. When passing in scatterometry to the X-ray range, it is necessary to take into account many factors that may make application of the technique in the production difficult or impossible. It is necessary to take into account the radiation defects, the negative effect on the photoresist and the underlying layers. At the transition to the FIB, the nomenclature of parasitic effects is further increased. The effect of FIB on the

задает рост альфа-фазы (кубической). Та, которая имеет более низкое контактное сопротивление по сравнению с бета (тетрагональной) фазой; тантал выступает в качестве основного ДБС-слоя, обеспечивает хорошую адгезию меди и, в дополнение, – необходимую кристаллографическую ориентацию наносимого впоследствии затравочного слоя меди. Слои TaN и Ta можно наносить в одной камере, что делает применение данной ДБС-структуры экономически оправданным. Типичная структура медной металлизации, в которой используется ДБС на основе тантала и его нитрида, приведена на рис.5.

В настоящее время для пооперационного контроля процессов получения данной структуры используются интерферометрические (эллипсометрия), рентгеновские (РР, РФС) и фотоакустические методики [32], которые не позволяют определить отдельные значения толщин слоев Ta и TaN по следующим причинам:

- схожесть оптических свойств – для эллипсометрии;
- размытая граница раздела – для РР;
- низкая чувствительность к азоту – для РФС;
- схожесть значений акустических импедансов – для фотоакустики.

При этом, именно толщина слоя тантала является критически важным параметром, так как она определяет диффузионно-барьерные свойства структуры.

Рис.5. Типичная структура медной металлизации с диффузионно-барьерными слоями на основе Ta и TaN

Fig.5. Typical structure of copper metallization with diffusion-barrier layers based on Ta and TaN

Данные обстоятельства привели к тому, что распространенной практикой стало измерение в технологическом цикле только общей толщины двойной структуры. Толщины же отдельных слоев получают косвенно – по измерениям на пластинах-спутниках. Для этого используются две дополнительные пластины: одна содержит пленку нитрида тантала, другая – тантал, нанесенные в тех же режимах, что и для получения каждого из слоев в интегрированной структуре. Такой метод не позволяет учесть размытие границы

material structure was discussed at a recent ConFab-2017 conference [26] and in one of the latest issues of SolidState Technology journal [27], and was also considered in recent works by both foreign authors [28] and us [29].

CONTROL OF BLURRING OF INTERFACES

An important feature that must be taken into account when controlling nanoscale structures is the blurring of the interfaces of the material that occurs when they are interdiffused. When the absolute values of the element sizes decrease, the relative

contribution of these effects increases. And in some cases, they can lead to a complete loss of functional properties of the structure and, as a consequence, to the complete failure of the product. An example of such a case may be the diffusion-barrier structure used in the technology of copper metallization – the Damascene process. It uses a double structure based on tantalum and its nitride. The properties of these DBC structures, as well as the reasons for choosing them for copper metallization, are described in detail in [30, 31] and other works. For our

purposes, we only need to mention the functional purpose of each of the layers in this structure: TaN provides adhesion to the interlayer dielectric (both to oxide and to low-k dielectrics), has satisfactory diffusion-barrier properties, and also determines the growth of the alpha phase (cubic) of Ta, which has a lower contact resistance compared to the beta (tetragonal) phase; tantalum acts as the basic DBC layer, provides good adhesion of copper and, in addition, the necessary crystallographic orientation of the subsequently deposited seed layer of copper.

Рис.6. Восстановленный по комплексной методике РР+МУРР профиль распределения электронной плотности по глубине структуры Ta / TaN

Fig.6. Profile of distribution of electron density on depth of Ta / TaN structure obtained using XRR+SAS method

раздела, неизбежно происходящее при получении интегрированной структуры. По мере развития технологии, толщины слоев в ДБС-структурах снижаются. Например, для технологических уровней ниже 65 нм общая толщина диффузионно-барьерной структуры должна быть меньше 5 нм [33]. Это обуславливает необходимость учета границы раздела между материалами.

The layers of TaN and Ta can be deposited in one chamber, which makes the use of this DBC structure economically justified. A typical structure of copper metallization, in which DBC on the basis of tantalum and its nitride is used, is shown in Fig.5.

At present, interferometric (ellipsometry), X-ray (XRR, XRF) and photoacoustic techniques [32] are used for the operational control of the processes of obtaining this structure, which do not allow us to determine the separate thickness values of the Ta and TaN layers for the following reasons:

- similarity of optical properties – for ellipsometry;
- blurred interface – for XRR;
- low sensitivity to nitrogen – for XRF;
- similarity of acoustic impedance values – for photoacoustics.

However, the thickness of the tantalum layer is a critically important parameter, since it determines the diffusion-barrier properties of the structure.

These circumstances led to the fact that the common practice is to measure in the process cycle only the overall thickness of the double structure. The

Коллективом с участием авторов настоящей статьи была предложена методика, позволяющая получать отдельные значения толщин пленок Ta и TaN. Она предполагает совместное использование РР и малоуглового рассеяния (МУРР), которые для поиска решения объединяются в единый цикл обработки данных. Эта методика подробно описана в работе [34]. Данная методика позволила получить профиль распределения электронной плотности по глубине образца, а также установить за счет чего она изменяется в данном образце. Последнее было сделано с помощью метода МУРР, добавление которого позволило разрешить неоднозначность "плотность-шероховатость" [35, 36] и, в конечном итоге, выявить факт диффузии азота из пленки нитрида тантала в пленку тантала. Данное явление должно учитываться при проектировании приборов, так как оно ведет к деградации барьерных свойств структуры. Недостаточные барьерные свойства таких структур могут приводить к снижению надежности ИС вплоть до полной потери потребительских качеств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен процесс контроля технологического цикла производства наноразмерных изделий твердотельной электроники и показано, что во многих случаях требуется пересмотр существующих методик контроля для удовлетворения предъявляемых к этому процессу требований. Для увеличения достоверности получаемых результатов в некоторых случаях необходим переход

thicknesses of the individual layers are obtained indirectly – from measurements on the satellite wafers. For this, two additional wafers are used: one contains a film of tantalum nitride, the other – of tantalum deposited in the same modes as for obtaining each of the layers in the integrated structure. Such a method does not allow taking into account the blurring of the interface, which inevitably occurs when an integrated structure is obtained. As the technology develops, the thickness of the layers in the DBC structures decreases. For example, for

на комплексные методики контроля, подразумевающие комплементарное, взаимодополняющее применение нескольких различных методов. Иногда такой подход является единственно возможным для получения необходимого результата. Если ранее при контроле процессов, например, субмикронной технологии, можно было выбрать из существующих методик ту, что является оптимальной для данного случая, то в современной технологии этого зачастую сделать нельзя, так как такой методики просто не существует.

В работе показывается необходимость учета специфических явлений, присущих переходу к получению наноразмерных элементов и структур. Среди них, во-первых, следует упомянуть изменение механических и структурных свойств у нанобъектов, а также явления диффузии и поверхностные эффекты. По мере развития технологии в сторону уменьшения размеров изготавливаемых элементов, данные эффекты начинают играть определяющую роль в свойствах получаемых структур и, следовательно, обязателен их учет при организации контроля технологических процессов.

Развитие технологии и движение проектных норм в сторону уменьшения, как уже было неоднократно показано, связаны с коренным изменением фундаментальных свойств материалов и структур, что было предметом обсуждения в работе [1]. Эффективный контроль технологического процесса базируется на учете этих изменений. Некоторые из них следует специально отметить, как оказывающие особое влияние

на контроль технологического процесса и необходимость разработки новых технических средств.

Прежде всего, необходимо учитывать изменение структуры материала и переход в новое состояние, в частности квази-жидкость. Недавно компания IBM представила изображение транзисторной структуры, изготовленной по технологии 7 нм [37] (рис.7). Появившаяся в последнее время информация показывает, что при таких размерах структура, по-видимому, полностью является упорядоченной аморфной, либо по существующей терминологии – квази-жидкой, и ее механические свойства существенно отличаются от свойств известного нам монокристаллического кремния.

В то же время, на прошедших недавно конференциях [26] и в опубликованных работах [27, 28] подробно рассматриваются вопросы, связанные с воздействием самих измерительных методик на структуру наноразмерных объектов. Эти эффекты необходимо тщательным образом учитывать при построении системы технологического контроля производства, чтобы получать достоверные результаты измерения, и, как следствие, иметь высокий процент выхода годных изделий.

И, наконец, технологические возможности формирования малоразмерных (наноразмерных) электронных, либо электронно-оптических структур нуждаются в использовании новых технологических методов и новых измерительных методик. В современной литературе

design rules below 65 nm, the total thickness of the diffusion barrier structure should be less than 5 nm [33]. This makes it necessary to take into account the interface between materials.

The team, with the participation of the authors of this paper, proposed a technique that makes it possible to obtain separate values for the thicknesses of Ta and TaN films. It involves the combined use of XRR and small angle X-ray scattering (SAXS), which, in order to find solutions, are combined into a single data processing cycle. This technique is described in detail in [34]. It made it possible

to obtain a distribution profile of the electron density along the depth of the sample, and also to establish how it changes in this sample. The latter was done thanks to SAXS, the addition of which allowed to resolve the ambiguity "density-roughness" [35, 36] and, ultimately, to reveal the fact of diffusion of nitrogen from the tantalum nitride film into the tantalum film. This phenomenon should be taken into account in the design of devices, as it leads to the degradation of the barrier properties of the structure. Inadequate barrier properties of such structures can lead to

a decrease in the reliability of IC up to the total loss of consumer qualities.

CONCLUSION

The paper considers the process of control of the production of nanoscale products of solid-state electronics and it is shown that in many cases a revision of existing control methods is required to satisfy the requirements for this process. In order to increase the reliability of the results obtained, in some cases a transition to complex control techniques is required, implying a complementary use of several different methods.

Рис.7. Приборная структура FinFET-транзисторов, изготовленная по технологии 7 нм. Изображение компании IBM [37]

Fig.7. Structure of FinFET transistors manufactured using 7 nm technology. Image courtesy of IBM [37]

демонстрационные образцы таких структур пытаются изготовить с помощью хорошо контролируемых и в ряде случаев уникальных методов, к которым следует отнести молекулярно-лучевую эпитаксию. Однако в реальной технологии для

массового производства эта технология мало пригодна и может уступать хорошо известным методам, в частности, радиационной технологии и, прежде всего, ионной имплантации. В качестве примера посмотрим на историю развития технологии создания светоизлучающих структур на базе SiGe квантовых точек. Многие опубликованные исследования, посвященные изготовлению таких структур, проведены с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии. В то же время мы глубоко убеждены, что массовое производство подобных приборов может и должно основываться на использовании ионной имплантации (ионного синтеза), как было неоднократно показано в наших работах [38–41].

Авторы благодарят Д.И.Смирнова за участие в измерениях рентгеновскими методами и за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко Н.Н., Волоховский А.Д., Запорожан О.А. Учет особенностей изменения свойств материала при организации технологии кремниевых наноструктур // НАНОИНДУСТРИЯ. 2017. Т. 75. № 7. С. 84–103.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981.
3. Ma Z.J., Chen J.C., Liu Z.H. et al. Suppression of boron penetration in p+ poly silicon gate P-MOSFETs using low-temperature gate-oxide N_2O // IEEE Electron Device Letters. 1994. Vol. 15. P. 109.

Sometimes this approach is the only one possible to obtain the desired result. If when controlling processes, for example, of submicron technology, you could choose from the existing methods one that is optimal for the given case, in modern technology this can often not be done, since such a technique simply does not exist.

The paper shows the need to take into account the specific phenomena inherent in the transition to the production of nanoscale elements and structures. Among them, firstly, we should mention the change in mechanical and structural

properties of nano-objects, as well as diffusion phenomena and surface effects. With the development of technology in the direction of reducing the size of the elements produced, these effects begin to play a decisive role in the properties of the structures obtained and, consequently, they must be taken into account when organizing the process control.

The development of technology and the movement of design standards in the direction of reduction, as has been shown repeatedly, are associated with a fundamental change in the properties of materials and structures,

which was the subject of discussion in [1]. Effective process control is based on taking these changes into account. Some of them should be specially noted as having a special impact on the process control and the need to develop new tools.

First of all, it is necessary to take into account the change in the structure of the material and the transition to a new state, in particular quasi-liquid. Recently, IBM introduced a picture of a transistor structure manufactured using 7 nm process [37] (Fig.7). The recent information shows that at such sizes the structure appears to be

4. **Fanton J.T., Opsal J., Rosencwaig A.** A novel technique for performing ellipsometric measurements in a sub-micrometer area // *Proceedings of SPIE*. 1993. Vol. 2004. P. 322.
5. **Opsal J., Fanton J., Chen J.** et al. Broadband spectral operation of a rotating-compensator Ellipsometer // *Thin Solid Films*. 1998. Vol. 313-314. P. 58.
6. **Fanton J.T., Opsal J., Willenborg D.L.** et al. Multiparameter measurements of thin films using beam-profile reflectometry // *Journal of Applied Physics*. 1993. Vol. 73. № 11. P. 7035.
7. **Opsal J., Fanton J., Chen J.** et al. Broadband spectral operation of a rotating-compensator Ellipsometer // *Thin Solid Films*. 1998. Vol. 313-314. P. 58.
8. **Morris S.J., Clifford E., Sorkhabi O.** Multi-Technology Measurements of Nitrided Oxide and High-K Gate Stacks // *C 788, Characterization and Metrology for ULSI Technology*. 2005.
9. **Cain J.P., Robie S., Zhang Q.** et al. Combined use of X-ray reflectometry and spectroscopic ellipsometry for characterization of thin film optical properties // *Proceedings of SPIE, 31st International Symposium on Advanced Lithography*. International Society for Optics and Photonics. 2006. Vol. 6155. P. 61550P.
10. **Смирнов Д.И., Гиниятуллин Р.М., Зюльков И.Ю., Герасименко Н.Н.** Проблемы измерения параметров элементов и структур современной микро- и наноэлектроники на примере диффузионно-барьерных структур TiN/Ti // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. Вып. 14. С. 34.
11. **Jellison G.E. (Jr.)**. Physics of optical metrology of silicon-based semiconductor devices in *Handbook of Silicon Semiconductor Metrology* / Ed. by **Diebold A.C.** – NY: Marcel Dekker. 2001. P. 763.
12. **Stehle J.L., Boher P., Defranoux C.** et al. Ultraviolet, vacuum ultraviolet, and extreme ultraviolet spectroscopic reflectometry and ellipsometry in *Handbook of Silicon Semiconductor Metrology* / Ed. by **Diebold A.C.** – NY: Marcel Dekker. 2001. P. 761.
13. **Deslattes R.D., Matyi R.J.** Analysis of thin-layer structures by X-ray reflectometry in *Handbook of Silicon Semiconductor Metrology* / Ed. by **Diebold A.C.** – NY: Marcel Dekker, 2001. P. 789.
14. **Gibaud A., Hazra S.** X-ray reflectivity and diffuse scattering // *Current Science*. 2000. Vol. 78. № 12. P. 1467.
15. **Goldstein J.I.** et.al. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* // NY: Plenum Press, 1981. P. 99.

16. **Ukraitsev V.A., Baum C., Zhang G. and Hall C.L.** The role of AFM in semiconductor technology development: the 65 nm technology node and beyond // *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 5752. P. 127.
17. **Thony P., Herisson D., Henry D. et al.** Review of C measurement and scatterometry // *Proceedings of the Characterization and Metrology for VLSI Technology*. 2003. P. 381–388.
18. **Chen X., Shi Y., Jiang H. et al.** Nondestructive analysis of lithographic patterns with natural line edge roughness from Mueller matrix ellipsometric data // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 388. P. 524.
19. **Lina C., Huang C., Hsu C. et al.** Fast and accurate scatterometry metrology method for STI CMP step height process evaluation // *Proceedings of SPIE*. 2012. Vol. 8324. P. 832421.
20. **Melzer R., Hartig C., Grasshoff G. et al.** Through Pitch monitoring by optical scatterometry // *Proceedings of SPIE*. 2015. Vol. 9424. P. 942429.
21. **Leray P., Lorusso G.F., Cheng S. et al.** Accurate and Reliable Optical C of MuGFET down to 10nm // *Proceedings of SPIE*. 2003. Vol. 6518. P. 65183B.
22. **Gross H., Henn M., Heidenreich S. et al.** Modeling of line roughness and its impact on the diffraction intensities and the reconstructed critical dimensions in scatterometry // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51. No. 30. P. 7384.
23. **Волоховский А.Д., Герасименко Н.Н., Петраков Д.С.** Применение комбинированных оптических методов контроля процесса травления щелевой изоляции // *Известия ВУЗов. Микроэлектроника*. 2017. Т. 22. № 4.
24. **Ito Y., Higuchi A., Omote K.** Characterization of cross-sectional profile of resist L/S and hole pattern using CD-SAXS // *Proceedings of SPIE*. 2016. Vol. 9778. P. 97780L.
25. **England J., Min W.J., Kim J.** The application of medium energy ion scattering and other ion beam analysis techniques to measure doped Si nanostructures // *Abstract book "Formation of 3D nanostructures by ion beams"*. Helsinki, June 26–30, 2017.
26. Сборник тезисов конференции ConFab – 2017, May 14–17, 2017. San Diego, CA. [URL]: <http://theconfab.com/2017-conference/2017-conference-proceedings>.
27. Engineering techniques is damaging material, research reveals // *Solid state technology blogs* [URL]: <http://electroi.com/blog/2017/04/engineering-technique-is-damaging-materials-research-reveals>.
28. **Hofmann F., Tarleton E., Harder R.J. et al.** 3D lattice distortions and defect structures in ion-implanted nanocrystals // *Science Reports*. 2017. Vol. 7. P. 45993.
29. **Gerasimenko N.N., Chamov A.A., Medetov N.A. et al.** Specific Features of Relief Formation on Silicon Etched by a Focused Ion Beam // *Technical Physics Letters*. 2010. Vol. 36. № 11. P. 991.
30. **Chena G.S., Leeb P.Y., Chena S.T.** Phase formation behavior and diffusion barrier property of reactively sputtered tantalum-based thin films used in semiconductor metallization // *Thin Solid Films*. 1999. Vol. 353. P. 264.
31. **Васильев В.А., Серегин Д.С., Воротилов К.А. и др.** Барьерные слои для систем металлизации

completely ordered amorphous, or, according to the existing terminology, quasi-liquid, and its mechanical properties differ substantially from the properties of the single-crystal silicon known to us.

At the same time, at the recent conferences [26] and in the published papers [27, 28], the problems connected with the influence of the measuring techniques themselves on the structure of nano-sized objects are considered in detail. These effects must be carefully taken into account when constructing a process control system to produce reliable measurement results and, as a

consequence, have a high percentage of yield.

And, finally, the technological possibilities for the formation of small-sized (nano-sized) electronic or electronic-optical structures require the use of new processes and new measurement techniques. In modern literature, samples of such structures are tried to obtain using such well-controlled and in some cases unique methods, as molecular-beam epitaxy. However, in real mass production, this technology is of little use and may be inferior to well-known methods, in particular, radiation technology and, above all, ion implantation.

As an example, let's look at the history of the development of technology for creating light-emitting structures based on SiGe quantum dots. Many published studies on the obtaining of such structures have been carried out using molecular beam epitaxy. At the same time, we are deeply convinced that the mass production of such devices can and must be based on the use of ion implantation (ionic synthesis), as has been repeatedly shown in our works [38–41]. ■

The authors thank D.Smirnov for taking part in measurements by X-ray methods and for discussing the results obtained.

- СБИС / В кн.: Intermatic: материалы VI Международной научно-технической конференции. Москва. 21-23 октября 2008. С. 43.
32. **Hostetler J.L., Smith A.N., and Norris P.M.** Thin-film thermal conductivity and thickness measurements using picosecond ultrasonics // *Microscale Thermophysical Engineering*. 1997. Vol. 1. P. 237.
 33. **Kim H., Kellock A.J., Park D.** Robust TaNx diffusion barrier for Cu-interconnect technology with subnanometer thickness by metal-organic plasma-enhanced atomic layer deposition // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 98. P. 014308.
 34. **Смирнов Д.И., Герасименко Н.Н., Овчинников В.В.** Применение двухволновой рентгено-оптической схемы совместных измерений зеркального отражения и диффузного рассеяния рентгеновского излучения для исследования многослойных тонкопленочных структур // *Известия вузов. Электроника*. 2016. Т. 21. № 1.
 35. **Sinha S.K., Sirota E.B., Garoff S. et al.** X-ray and neutron scattering from rough surfaces // *II Phys. Rev.B*. 1988. Vol. 38. No. 4. P. 2297-2311.
 36. **Holy V., Pietsch U., Baumbach T.** High-resolution X-ray scattering from thin films and multilayers // *Springer Tracts in Modern Physics*. 2004. Vol. 149. P. 408.
 37. **Antony S.** Beyond silicon: IBM unveils world's first 7nm chip [URL]: <https://arstechnica.co.uk/gadgets/2015/07/ibm-unveils-industrys-first-7nm-chip-moving-beyond-silicon>.
 38. **Пархоменко Ю.Н. и др.** Свойства самоорганизованных SiGe-наноструктур, полученных методом ионной имплантации // *Физика и техника полупроводников*. 2004. Т. 38. № 5. С. 593-597.
 39. **Gerasimenko N.N., Zaporogan O.A., Smirnov D.I. and Volokhovskiy A.D.** Controllable radiation-induced transformations in silicon nanostructures // *Abstract book: 25th international symposium "Nanostructures: Physics and Technology"*, Saint Petersburg. 26-30 June 2017. P. 270-271.
 40. **Gerasimenko N.N., Zaporogan O.A., Smirnov D.I. and Volokhovskiy A.D.** Controllable Radiation-Induced Formation of Silicon Nanostructures // *Abstract book: workshop "Formation of 3D Nanostructures by Ion Beams"*. Helsinki. 28-30 June, 2017. P. 87-88.
 41. **Balakleyskiy N., Gerasimenko N., Zaporozhan O.** Room Temperature Photoluminescence from Self-Organized Germanium QD Formed by Ion Implantation in Silicon // *Proceedings of the "Advanced Solid State Lasers Conference"*, Nagoya, 1-5 October 2017 (принята к печати в *Optical Materials Express*).