

И.П. Конуп, Т.В. Гудзенко, Л.А. Конуп, О.В. Волювач

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова,
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина,
тел.: +38(068) 259 33 08, e-mail: tgudzenko@ukr.net

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ БИОСУРФАКТАНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ НАНОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Цель. Исследование взаимодействия некоторых природных и полусинтетических поверхностно-активных веществ (ПАВ) с поверхностью полупроводниковых структур на основе нанопористого кремния (нано-ПК) **Методы.** Образцы нано-ПК с высоким уровнем легирования (КЭС-0,01) были получены методом анодного электрохимического травления монокристаллического кремния в электролите на основе 48%-ного водного раствора фтористо-водородной кислоты. Низкое сопротивление контактов определялось отжигом (450 °С) образцов нано-ПК с нанесенными на них алюминиевыми контактами. Детектирование проводили для биосурфактантов: саркозила (натрий лаурилсаркозин), рамнолипида (рамнозо- ди β-гидроксидеканоеновая кислота) и циклогептадекановой кислоты. **Результаты.** Изучено взаимодействие биосурфактантов с поверхностью нано-ПК. Показано, что эти соединения существенно влияют на вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов нано-ПК. В рамках адсорбционной модели объяснено взаимодействие исследованных ПАВ с нано-ПК. Изменение ВАХ образцов нано-ПК при нанесении супрамолекулярных объектов связано с наполнением нанопор этими макромолекулами, обладающими значительной диэлектрической проницаемостью. Показано, что влияние изученных ПАВ на электрические параметры нано-ПК имеет характерные особенности для каждого из исследованных соединений, что позволяет дифференцировать идентифицировать различные ПАВ сенсорами на основе нано-ПК. **Вывод.** Физическая причина изменения ВАХ образцов нано-ПК при нанесении биосурфактантов связана с наполнением нанопор кремния мультислойными структурами ПАВ. Сложный вид ВАХ при адсорбции саркозила, рамнолипида, циклогептадекановой кислоты определяется гетеропереходами между планарными алюминиевыми контактами и наноструктурами кремния, и изменениями в области микрорельефов, сформированных между нитевидными кристаллами поверхности нано-ПК.

Ключевые слова: нанопористый кремний, сенсоры, саркозил, рамнолипид, циклогептадекановая кислота.

Развитие современных технологий в промышленности требует создания новых сенсорных элементов, являющихся основой для приборов контроля окружающей среды. Это обусловлено серьезными экологическими проблемами, среди которых загрязнение атмосферы, воды и почвы промышленными отходами и органическими соединениями, что особенно актуально.

© И.П. Конуп, Т.В. Гудзенко, Л.А. Конуп, О.В. Волювач



Для контроля степени загрязнения окружающей среды были созданы измерительные контролирующие системы, которые определяют состав атмосферы и содержание вредных веществ в той или иной среде. С этой целью были разработаны различные типы аналитических приборов. В большинстве случаев эти приборы могут с достаточной точностью определять состав исследуемого объекта, однако они являются дорогостоящим оборудованием с большим временем обработки результатов и очень редко могут быть использованы в режиме реального времени.

В качестве альтернативных методов были предложены твердотельные сенсорные элементы [5, 8, 13, 14]. Сенсорный элемент состоит из адсорбционно чувствительного слоя, который при адсорбции на нем молекул газа или жидкости меняет свойства, и трансдюсера, который позволяет перевести сигнал сенсора в более удобный для обработки.

В настоящее время имеются разработки полупроводниковых сенсоров на основе новых перспективных материалов, таких, как ПК [11]. Важной особенностью пористого кремния является высокая адсорбционная способность по отношению к биологическим и органическим молекулам [12]. Это свойство кремния уже используется в медицине для создания материалов, получивших торговое название “Biosilicon” [2]. Развитие полупроводниковой биосенсорной электроники стимулирует проведение экспериментальных исследований электронных и адсорбционно-десорбционных процессов, происходящих на поверхности полупроводниковых материалов типа ПК при взаимодействии их с молекулярными и надмолекулярными объектами биологической среды. Влияние адсорбции таких биоорганических объектов на полупроводниковые структуры на основе ПК вызывает сложные изменения электронных свойств материала, что и проявляется в изменениях закономерностей адсорбционных процессов.

Цель работы – исследовать взаимодействие некоторых природных и полусинтетических ПАВ с поверхностью полупроводниковых структур на основе нано-пористого кремния.

Материалы и методы

Образцы нано-ПК с высоким уровнем легирования (КСС-0,01) были получены методом анодного электрохимического травления монокристаллического кремния в электролите на основе 48%-ного водного раствора фтористо-водородной кислоты [7]. В процессе травления использовали световую и ультразвуковую обработку поверхности кремния. На поверхность нано-ПК наносились специальные электрические контакты из алюминия. Контакт алюминия с нано-ПК омический. Низкое сопротивление этого контакта определялось высоким уровнем легирования исходных образцов монокристаллического кремния и отжигом при температуре 450 °С в течение 30 минут образцов нано-ПК с нанесенными на них алюминиевыми контактами.

Выбранные для исследований образцы проходили дополнительную плазмохимическую обработку ионами фтора и водорода. Ионы фтора и водорода оказывают стабилизирующее действие на электрические свойства материала. Фтор активной кислорода, поэтому после обработки фтором контакт



образца с воздушной атмосферой не сопровождался изменениями состава поверхности материала. Эта технологическая операция замедляла процессы «старения» кремния при взаимодействии с воздухом и водой [10].

Исходные образцы нано-ПК, выдержанные один час в вакууме при $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ имели классические [6] вольтамперные характеристики: при сканировании от 0,7 до 10 в ток изменялся в пределах двух порядков. Сила тока (I) прямо пропорционально зависела от напряжения (U).

Детектирование проводили для полусинтетического сурфактанта саркозила (замещенный лауриновой кислотой природный саркозин - метаболит, встречающийся в том числе и у микроорганизмов), природных ПАВ: метаболитов псевдомонад – рамнолипида (рамнозо- ди β -гидроксидеканоеновая кислота) и циклогептадекановой кислоты.

В работе использовали высокочастотный вольтметр В7-21 и электрометр (амперметр) постоянного тока (типа В7-30 и В7-21), позволяющие измерять токи в диапазоне от 10^{-13} до 10^{-3} А.

Всего было исследовано 12 образцов при трехкратной повторяемости для каждого из ПАВ и контроля. Математическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа с помощью компьютерной программы «Microsoft Office Excel 2003» с определением t -критерия Стьюдента. Статистически вероятной считали разницу при $p < 0,05$.

Методика нанесения органических молекул на поверхность ПК. Особенность методики заключалась в необходимости анализа амфифильных молекул на поверхности сенсорного элемента, работающего в газовой среде, например, в воздухе. После растворения исследуемых веществ в свежеприготовленной дистиллированной воде в концентрации 0,1 % растворы подвергались дегазации, в вакууме удалялся воздух при давлении 10 мм рт. ст. в течение 30 мин. при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. На образцы нано-ПК наносили растворы дозатором в объеме 5 мкл. После 3 мин экспозиции в вакууме с поверхности нано-ПК удаляли краешками фильтровальной бумаги остатки растворов исследуемых веществ. Адсорбцию исследуемых молекул проводили в течение 45 мин. при нормальных условиях ($P = 760$ мм рт. ст., $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Затем растворы высушивали в эксикаторе с CaCl_2 в течение 1 часа.

Результаты исследований и их обсуждение

Для проведения исследований были выбраны серии образцов нано-ПК с размерами пор от 10 до 200 нм (размер пор определяется технологией изготовления нано-ПК). Размер пор определялся по результатам атомно-силовой микроскопии [3] и практически идентичными электронными параметрами при изготовлении (кристаллы из одной матрицы анодированного высоколегированного кремния). Размеры исследованных ПАВ (мицеллы и мультиламеллярные структуры) [1] были соизмеримы с размерами нанопор в структурах нано-ПК. Это делает нано-ПК наиболее подходящим материалом для селективного определения органических молекул, в том числе и выбранных супрамолекулярных структур поверхностно-активных соединений.

Электрофизические характеристики образцов нано-ПК до и после адсорбции саркозила, рамнолипида, циклогептадекановой кислоты определяли на



установке, позволяющей проводить измерения на воздухе.

Влияние адсорбции органических молекул на электрофизические свойства структур nano-ПК. После адсорбции органических молекул (ПАВ) на поверхность образцов nano-ПК вольтамперные характеристики $I(U)$, измеренные при комнатной температуре, приобретают сложный характер (рис. 1). Изменения ВАХ однозначно связаны с наличием супрамолекулярных структур исследованных ПАВ внутри нанопористого слоя кремния, которые приводят к таким изменениям зависимостей тока от напряжения. Погрешность измерений составляла менее 2%, поэтому сложный характер полученных кривых с максимумами и перегибами связан с внутренней микроструктурой образцов (рис. 1).

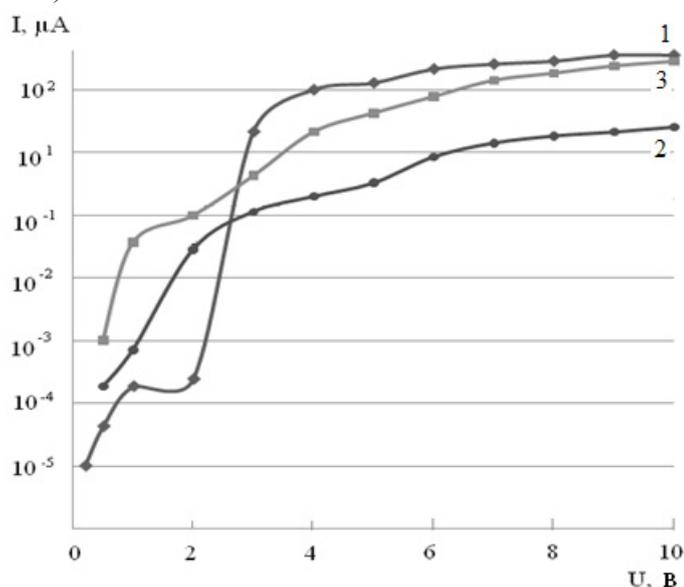


Рис. 1. Вольтамперные характеристики, измеренные в планарном режиме структур nano-ПК, при адсорбции саркозила, рамнолипида и циклогептадекановой кислоты (кривые 1–3 соответственно).

Fig. 1. The type of current-voltage characteristics measured in the planar regime of nano-PS structures upon adsorption of sarcosyl, rhamnolipid and cycloheptadecanoic acid (the curves 1–3 respectively).

На рис. 1 представлена зависимость ВАХ при нанесении молекул саркозила, рамнолипида и циклогептадекановой кислот на образцы nano-ПК. Видно, что помимо роста тока на шесть-семь порядков вид вольтамперных характеристик приобретает сложный характер с несколькими максимумами.

Анализ полученных результатов (рис. 1) показывает, что ВАХ максимально отличаются от обычных для nano-ПК [6] для соединения (1): $\Delta I = f(\Delta(u_{1v-10v}))$ составляет более семи порядков, кривая имеет два максимума. Соединения (2) и (3) в меньшей степени, но также сильно влияют на ВАХ nano-ПК $\Delta I = f(\Delta(u_{1v-10v}))$ для соединения 2 составляет приблизительно четыре порядка; для соединения 3 $\Delta I = f(\Delta(u_{1v-10v}))$ составляет более, чем четыре порядка. Отмеченные выше свойства саркозила, по всей видимости, определяются свойствами N-метилглицинового фрагмента молекулы.

На рис. 2 показана адсорбционная чувствительность γ для этих же соединений, вычисленная как отношение тока после адсорбции к исходному значению тока. Как видно, наблюдается значительный рост нормированного тока по сравнению с исходным значением. Оценка измерения проводимости (адсорбционная чувствительность γ) в зависимости от приложенного напряжения представлена на рис. 2. Максимальная чувствительность имеет место при напряжении 5,5 в.

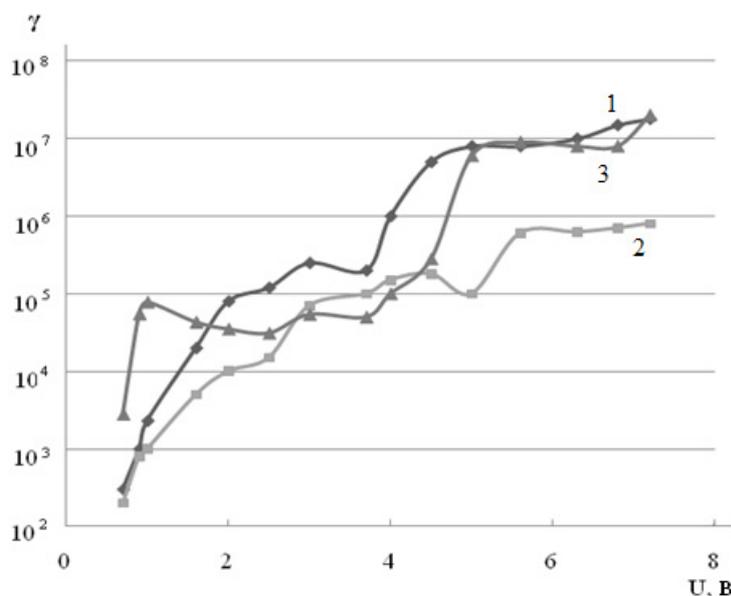


Рис. 2. Типичная зависимость адсорбционной чувствительности образца нано-ПК к исследованным супрамолекулярным структурам поверхностно-активных веществ при адсорбции саркозила (1), рамнолипида (2) и циклогептадекановой кислоты (3).

Fig. 2. Typical dependence of the adsorption sensitivity of a sample of nano-PS on the investigated supramolecular structures of surfactants upon adsorption of sarcosyl (1), rhamnolipid (2) and cycloheptadecanoic acid (3).

Обращает на себя внимание, что зависимость адсорбционной чувствительности не линейно изменяется при росте напряжения. Этот факт существенно отличается от линейной зависимости адсорбционной чувствительности при адсорбции органических молекул на поверхности нано-ПК [12]. Как видно из рис. 2, максимальная адсорбционная чувствительность наблюдается для саркозила и циклогептадекановой кислоты. Высокая степень сродства саркозила к нано-ПК отмечена выше. Значительная адсорбционная чувствительность нано-ПК к циклогептадекановой кислоте, по всей видимости, определяется циклогептиловым фрагментом молекулы этого ПАВ.

Ни один из известных механизмов [4] не может описать такое поведение вольтамперных характеристик, которое наблюдается после адсорбции исследованных биосурфактантов. Если считать, что структура нано-ПК состоит из значительного числа соединённых между собой нитей разного диаметра, то при наличии омических контактов из алюминия механизм переноса тока можно связать с изменениями свойств барьеров, формируемыми между ними. Очевидно, что имеет место значительное число включенных последовательно



и параллельно структур, имеющих переменную ширину зоны и обладающих эффектом выпрямления. Тогда характер ВАХ определяется прохождением тока по включенным в прямом направлении диодным цепочкам. В этом случае форма ВАХ зависит от приложенного напряжения, что и наблюдалось в эксперименте (рис. 1) [9].

Физическая причина изменения ВАХ образцов nano-ПК при нанесении биосурфактантов связана с наполнением нанопор кремния мультислойными структурами ПАВ, обладающими значительной диэлектрической проницаемостью [1]. Сложный вид ВАХ определяется переключением диодных структур детерминированных гетеропереходами (между двумя контактами щелевого типа и nano-ПК образуются гетеропереходы, которые представляют собой диоды) между планарными алюминиевыми контактами и наноструктурами кремния с различными емкостными параметрами. На электрические параметры nano-ПК оказывает существенное влияние адсорбция супрамолекулярных структур ПАВ. При адсорбции саркозила, рамнолипида, циклогептадекановой кислоты на поверхности nano-ПК происходили изменения в области микрорбарьеров, сформированных между нитевидными кристаллами поверхности. Эти явления определяют характер изменения ВАХ nano-ПК при адсорбции на его развитой поверхности исследованных ПАВ.

I.P. Konup, T.V. Gudzenko, L.O. Konup, O.V. Voliuvach

Odesa National I.I. Mechnykov University,
2, Dvoryanska str., Odesa, 65082, Ukraine,
tel.: +38(068) 259 33 08, e-mail: tgudzenko@ukr.net

DETECTION OF BIOSURFACTANTS ON THE SURFACE OF NANOPOROUS SILICON

Summary

Aim. The investigation of the interaction of certain natural and semi-synthetic surfactants with the surface of semiconductor structures based on nanoporous silicon (nano-PC). **Methods.** The samples of nano-PS with a high doping level (KC-0.01) were obtained by anodic electrochemical etching of single-crystal silicon in an electrolyte on the basis of 48% aqueous solution of hydrofluoric acid. The low contact resistance was determined by annealing (450 °C) of the samples of nano-PS with aluminum contacts deposited on them. The detection was carried out for biosurfactants: sarcosyl (sodium lauryl sarcosine), ramolipid (rhamnolipid β -hydroxydecanoic acid) and cycloheptadecanoic acid. **Results.** The interaction of biosurfactants with the surface of nano-PC was studied. It is shown that these compounds significantly influence the volt-ampere characteristics of nano-PC samples. Within the framework of the adsorption model, the interaction of the investigated surfactants with nano-PC is explained. The change in current-voltage characteristic (CVC) samples of nano-PC during the deposition of supramolecular objects is associated with the filling of nanopores with these macromolecules possessing a significant dielectric constant. It is shown that the effect of the surfactants studied on the electrical parameters of nano-PC has the characteristic features for each of the compounds studied, which allows differentiating the different surface-active substances differentially on the basis of nano-PC.



Conclusion. The physical reason for the change in the I–V characteristics of nano-PC samples during application of biosurfactants is related to the filling of nano-PS with multilamellar surfactant structures. The complex form of the CVC for the adsorption of sarcosyl, rhamnolipid, cycloheptadecanoic acid is determined by heterojunctions between planar aluminum contacts and silicon nanostructures, and changes in the region of microballoons formed between filamentary crystals of the surface of the nano-PC.

Key words: nano-porous silicon, sensors, sarcosyl, rhamnolipid, cycloheptadecanoic acid.

І.П. Конуп, Т.В. Гудзенко, Л.А. Конуп, О.В. Волювач

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна;
тел.: +38(068) 259 33 08, e-mail: tgudzenko@ukr.net

ДЕТЕКТУВАННЯ БІОСУРФАКТАНТІВ НА ПОВЕРХНІ НАНОПОРИСТОГО КРЕМНІЮ

Реферат

Мета. Дослідження взаємодії деяких природних і напівсинтетичних поверхнево-активних речовин (ПАР) з поверхнею напівпровідникових структур на основі нанопористого кремнію (нано-ПК). **Методи.** Зразки нано-ПК з високим рівнем легування (КСС-0,01) були отримані методом анодного електродічного травлення монокристалічного кремнію в електроліті на основі 48%-ного водного розчину фтористо-водневої кислоти. Низький опір контактів визначалося відпалом (450 0С) зразків нано-ПК з нанесеними на них алюмінієвими контактами. Детектування проводили для біосурфактантів: саркозилу (натрій лаурилсаркозин), рамноліпиду (рамнозо-ди-β-гідроксидеканоєнова кислота) і циклогептадеканоєвої кислоти. **Результати.** Вивчено взаємодію біосурфактантів з поверхнею нано-ПК. Показано, що ці сполуки суттєво впливають на вольтамперні характеристики (ВАХ) зразків нано-ПК. В рамках адсорбційної моделі пояснено взаємодію досліджених ПАР з нано-ПК. Зміна ВАХ зразків нано-ПК при нанесенні супрамолекулярних об'єктів пов'язано з наповненням нанопор цими макромолекулами, що володіють значною діелектричною проникністю. Показано, що вплив вивчених ПАР на електричні параметри нано-ПК має характерні особливості для кожного з досліджених сполук, що дозволяє диференційовано ідентифікувати різні ПАР сенсорами на основі нано-ПК. **Висновок.** Фізична причина зміни ВАХ зразків нано-ПК при нанесенні біосурфактантів пов'язана з наповненням нанопор кремнію мультіламелярними структурами ПАР. Складний вид ВАХ при адсорбції саркозилу, рамноліпиду, циклогептадеканоєвої кислоти визначається гетеропереходами між планарними алюмінієвими контактами і наноструктурами кремнію, і зміною в області мікробар'єрів, сформованих між ниткоподібними кристалами поверхні нано-ПК.

Ключові слова: нанопоруватий кремній, сенсори, саркозил, рамноліпід, циклогептадеканоєва кислота.



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивков В.Г., Берестовский Г.Н.* Динамическая структура липидного слоя. – М.: Наука, 1981. – 296 с.
2. *Bechelany Mikhael, Balme Sebastien, Miele Philippe.* Atomic layer deposition of biobased nanostructured interfaces for energy, environmental and health applications // *Pure Appl. Chem.* – 2015. – 2(61). – P. 242–250.
3. *Bisi O., Ossicini Stefano, Pavesi L.* Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // *Surface Science Report.* – 2000. – **38**. – P. 1–126.
4. *Deachapunya S.* Slow beams of massive molecules // *Eur. Phys. J.D.* – 2008. – **46**. – P. 307–313.
5. *Elhag S., Ibutoto Z.H., Khranovskyy V., Willander M., Nur O.,* Habit-modifying additives and their morphological consequences on photoluminescence and glucose sensing properties of ZnO nanostructures, grown via aqueous chemical synthesis // *Vacuum.* – 2015. – **116**. – P. 21–26.
6. *Gerlich Stefan, Eibenberger Sandra, Tomandl Mathias, Nimmrichter Stefan, Hornberger Klaus, Paul J. Fagan, Jens Tuxen, Marcel Mayor, Markus Arndt.* Quantum interference of large organic molecules // *Nature Communications.* – 2011 – 2(263). – P. 1–5.
7. *Jing Wang, Yang Jiao, Yang Liu, Zhenglin Zhang, Fengyu Qu, and Xiang Wu.* Gas Phase Growth of Wurtzite ZnS Nanobelts on a Large Scale // *Journal of Nanomaterials.* – 2013. – (1–4) DOI: 10.1155/2013/596313
8. *Kang Z., Gu Y., Yan X., Bai Z., Liu Y., Liu S., Zhang X., Zhang Z., Zhang X, Zhang Y.* Enhanced photoelectrochemical property of ZnO nanorods array synthesized on reduced graphene oxide for self-powered biosensing application // *Biosens. Bioelectron.* – 2015. – **64**. – P. 499–504.
9. *Kasemo Bengt.* Biological surface science // *Surface Science.* – 2001. – P. 22–23.
10. *Makaraviciute A., Ruzgas T., Ramanavicius A.* Antibody fragment immobilization on planar gold and gold nanoparticle modified quartz crystal microbalance with dissipation sensor surfaces for immunosensor applications // *Analytical Methods.* – 2014. – **6**. – P. 2134–2140.
11. *Picciolini S., Castagnetti N., Vanna R., Mehn D., Bedoni M., Gramatica F., Villani M., Calestani D., Pavesi M., Lazzarini L., Zappettini A., Morasso C.* Branched gold nanoparticles on ZnO 3D architecture as biomedical SERS sensors, *RSC Adv.* – 2015. – **5**. – P. 93644–93651.
12. *Politi J., Rea I., Dardano P., De Stefano L., Gioffrè M.* Versatile synthesis of ZnO nanowires for quantitative optical sensing of molecular biorecognition // *Sens. Actuators B.* – 2015. – **220**. – P. 705–711.
13. *Sodzel D., Khranovsky V., Beni V., Turner A.P.F., Viter R., Eriksson M.O., Holtz P.-O., Janot J.-M., Bechelany M., Balme S., Smyntyna V., Kolesneva E., Dubovskaya L., Volotovskii I., Ubelis A., Yakimova R.* Continuous sensing of hydrogen peroxide and glucose via quenching of the UV and visible luminescence of ZnO nanoparticles // *Microchimica Acta.* – 2015. – **182**. – P. 1819–1826.
14. *Yakimova R., Selegård L., Khranovskyy V., Pearce R., Lloyd Spetz A., Uvdal K.* ZnO materials and surface tailoring for biosensing // *Front. Biosci.* – 2012. – **4**. – P. 254–278.



References

1. Ivkov VG, Berestovsky G.N. Dynamic structure of the lipid layer. Moscow: Nauka, 1981. 296.
2. Bechelany Mikhael, Balme Sebastien, Miele Philippe. Atomic layer deposition of biobased nanostructured interfaces for energy, environmental and health applications. *Pure Appl. Chem.* 2015; 2(61): 242-250.
3. Bisi O, Ossicini Stefano, Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. *Surface Science Report.* 2000; 38: 1-126.
4. Deachapunya S. Slow beams of massive molecules. *Eur. Phys. J.D.* 2008;46:307–313.
5. Elhag S, Ibupoto ZH, Khranovsky V, Willander M, Nur O. Habit-modifying additives and their morphological consequences on photoluminescence and glucose sensing properties of ZnO nanostructures, grown via aqueous chemical synthesis. *Vacuum.* 2015;116:21–26.
6. Gerlich Stefan, Eibenberger Sandra, Tomandl Mathias, Nimmrichter Stefan, Hornberger Klaus, Paul J. Fagan, Jens Tuxen, Marcel Mayor, Markus Arndt. Quantum interference of large organic molecules. *Nature Communications.* 2011;2(263):1–5.
7. Jing Wang, Yang Jiao, Yang Liu, Zhenglin Zhang, Fengyu Qu, and Xiang Wu, Gas Phase Growth of Wurtzite ZnS Nanobelts on a Large Scale. *Journal of Nanomaterials.* 2013:1–4 DOI: 10.1155/2013/596313
8. Kang Z, Gu Y, Yan X, Bai Z, Liu Y, Liu S, Zhang X, Zhang Z, Zhang X, Zhang Y. Enhanced photoelectrochemical property of ZnO nanorods array synthesized on reduced graphene oxide for self-powered biosensing application. *Biosens. Bioelectron.* 2015;64:499–504.
9. Kasemo Bengt. Biological surface science. *Surface Science.* 2001: 22–23.
10. Makaraviciute A, Ruzgas T, Ramanavicius A. Antibody fragment immobilization on planar gold and gold nanoparticle modified quartz crystal microbalance with dissipation sensor surfaces for immunosensor applications. *Analytical Methods.* 2014; 6:2134–2140.
11. Picciolini S, Castagnetti N, Vanna R, Mehn D, Bedoni M, Gramatica F, Villani M, Calestani D, Pavesi M, Lazzarini L, Zappettini A, Morasso C. Branched gold nanoparticles on ZnO 3D architecture as biomedical SERS sensors, *RSC Adv.* 2015;5:93644–93651.
12. Politi J, Rea I, Dardanoa P, De Stefano L, Gioffrè M. Versatile synthesis of ZnO nanowires for quantitative optical sensing of molecular biorecognition. *Sens. Actuators B.* 2015;220:705–711.
13. Sodel D, Khranovsky V, Beni V, Turner APF, Viter R, Eriksson MO, Holtz PO, Janot JM, Bechelany M, Balme S, Smyntyna V, Kolesneva E, Dubovskaya L, Volotovskii I, Ubelis A, Yakimova R. Continuous sensing of hydrogen peroxide and glucose via quenching of the UV and visible luminescence of ZnO nanoparticles. *Microchimica Acta.* 2015;182:1819–1826.
14. Yakimova R, Selegård L, Khranovsky V, Pearce R, Lloyd Spetz A, Uvdal K. ZnO materials and surface tailoring for biosensing. *Front. Biosci.* 2012;4:254–278.

Стаття надійшла до редакції 13.09.2017 р.

