
ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА, НАНОСИСТЕМ И МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.3

СИНТЕЗ МУЛЬТИГРАФЕНА НА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ НИКЕЛЯ МЕТОДОМ CVD*

Булатова Алсу Наилевна, кандидат физико-математических наук, Астраханский государственный университет, 414056, Россия, Астрахань, Татищева, 20 а, e-mail: anbulatova@mail.ru.

Актуальность применения графена в необычайно широком диапазоне различных технологических приложений, в первую очередь, обусловлена его экстраординарными физическими свойствами. В последние время активно ведутся исследования, посвященные разработке новых методов получения графена в макроскопических количествах. Наиболее вероятно, что в будущем электронные устройства будут изготавливаться на основе графеновых слоев, выращенных на различных подложках. Изучение влияния подложки на свойства графена открывает новые возможности в целенаправленном влиянии на характеристики этого уникального материала. В ходе проведенного исследования CVD методом были получены мультиграфеновые пленки и исследованы их оптические характеристики в УФ и видимом диапазоне. По данным оптической микроскопии и оже-спектроскопии мультиграфеновые пленки полностью, без разрывов покрывали поверхность подложки и имели толщину в 7–8 слоев, за исключением отдельных хлопьевидных областей (размером около 30 мкм) толщиной в 3–4 слоя. Было выявлено, что изменение количества слоев мультиграфена не влияет на профиль спектра в УФ-видимом диапазоне. Наибольшей пропускной способностью в этом диапазоне обладали хлопьевидные области. На всех спектрах был обнаружен пик поглощения в области $\lambda = 250$ нм, который соответствует π - π^ переходам ароматических связей C-C [5]. Увеличение поглощения в видимой области спектра, очевидно, вызвано влиянием Ni подложки и дефектами структуры мультиграфена.*

Ключевые слова: мультиграфен, CVD метод, никель, оптическая микроскопия, оже-спектроскопия, число слоев, рентгеновская дифрактометрия, УФ-видимый спектр.

SYNTHESIS OF MULTIGRAPHENE ON POLYCRYSTALLINE FILMS OF NICKEL BY CVD METHOD

Bulatova Alsu N., Cand. in Physics and Mathematics, Astrakhan State University, 20a Tatishchev str., Astrakhan, 414056, Russia, e-mail: anbulatova@mail.ru.

Actuality of application of graphene in an unusually wide range of different technological application is caused by its extraordinary physical properties. In recent time research on developing new

* Работа проведена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы научно-исследовательские работы по лоту «Проведение научных исследований коллективами под руководством приглашенных исследователей в области химии и новых материалов», номер ГК 02.740.11.5177.

methods for obtaining graphene in macroscopic quantities are being led actively. In future electronic devices will be made on the basis of the graphene layers grown on different substrates. Studies of the effect of substrate on the properties of graphene gives new possibilities in a meaningful influence on the characteristics of this unique material. During the study, CVD was employed to obtain multigraphene films and their optical properties in the UV and visible range were investigated. According to optical microscopy and Auger spectroscopy multigraphene films were obtained and they covered the surface of the substrate and had a thickness of 7–8 layers, with the exception of some flocculent areas (as small as 30 microns) in thickness of 3–4 layers. It was found out that the change in the number of layers multigraphene does not affect the profile of the spectrum in the UV-visible range. The highest throughput in this range had a flaky area. In all the spectra the absorption peak of $\lambda = 250$ nm was found that corresponds to π - π^ transitions of aromatic bonds C-C [5]. The increase of absorption in the visible spectrum is obvious due to the influence of Ni substrate and defects of multigraphene structure.*

Key words: multigraphene, CVD method, nickel, optical microscopy, Auger spectrometry, the number of layers, X-ray diffractometry, UV-visible spectrum.

ВВЕДЕНИЕ

Первые теоретические исследования графена были проведены более 60 лет назад [11, 12], но только в 2004 г. А. Геймом и К. Новоселовым были получены первые экспериментальные образцы путем микромеханического расщепления объемного монокристаллического графита [9]. Эта практическая демонстрация возможности отделения и стабильного существования графена стала настоящим прорывом в экспериментальных исследованиях физических свойств двумерных структур.

Последние 5 лет активно ведутся исследования, посвященные разработке новых методов получения графена в макроскопических количествах и по выявлению его новых необычных физико-химических свойств [1, 7]. В частности, уникальные электронно-оптические свойства графена делают его одним из самых перспективных материалов в лазерной технике, в опто- и нанoeлектронике [4, 6, 10]. Но несмотря на интенсивные исследования оптических свойств графена и других материалов на его основе, многие вопросы до сих пор остаются открытыми.

Целью данной работы было дальнейшее развитие технологии получения мультиграфена с использованием метода химического осаждения паров (CVD) и исследование его оптических характеристик в УФ и видимом диапазоне.

ТЕХНОЛОГИЯ

Синтез мультиграфена проводился методом (CVD).

Подложкой-катализатором для проведения CVD процесса была тонкая поликристаллическая Ni пленка толщиной $d = 300$ нм, полученная методом плазменного напыления на Si пластину $d = 0,5$ мм, покрытую SiO_2 $d = 1$ мкм, планарные размеры образца были 12×12 мм.

Синтез осуществлялся в среде пропилена при температуре 400°C , в вакуумной камере при давлении $1 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст., время протекания процесса – 5 мин., с последующим быстрым охлаждением образцов до 25°C со скоростью $15^\circ\text{C}/\text{мин}$.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Оптическая микроскопия. Первоначально определение относительной толщины выращенной мультиграфеновой пленки проводилось посредством оптической микроскопии. В полностью покрывающей поверхность образца тонкой нанокуглеродной пленке наблюдались более светлые хлопьевидные острова размером около 30 мкм (рис. 1).

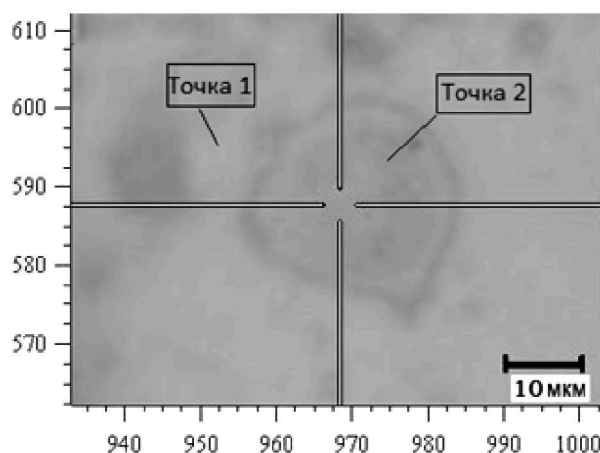


Рис. 1. Оптическое изображение поверхности образца:
точка 1 – мультиграфен, точка 2 – хлопьевидные области

Рентгеновская дифрактометрия. Для определения параметра решетки и ориентации монокристаллов подложки-катализатора в работе был использован рентгеновский дифрактометр STOE STADI-P, в котором использовалось $\text{Cu K}\alpha$ -излучение, при комнатной температуре, в интервале углов 2θ : $100 \leq 2\theta \leq 1200$. Погрешность определения параметров решетки составляла $\pm 0,0001$ нм.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, параметр решетки Ni был равен $a = 0,3511$ нм, ориентация (111). Такой выбор позволил достигнуть наименьших рассогласований между кристаллическими структурами подложки и мультиграфеновой пленкой (параметр решетки графена $a = 0,246$ нм [12]) и, соответственно, значительно уменьшить количество дефектов, вызываемых микронапряжениями.

Известно, что на грани (002) шестиугольные кольца углерода дают пик при угле $2\theta = 26,60^\circ$. Но в связи с тем что при рентгеноструктурном анализе интенсивный четкий пик плоскости регистрируется только в том случае, если количество плоскостей не менее ста, то в нашем случае, на дифрактограммах он не был обнаружен (рис. 2).

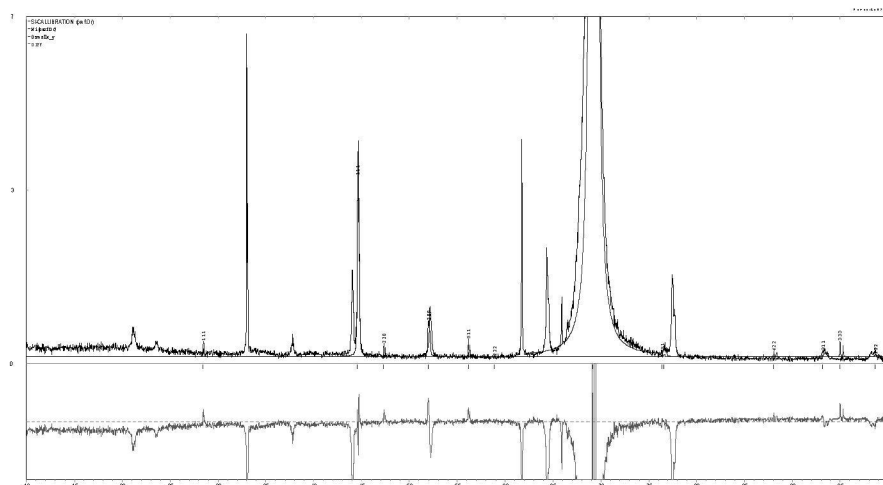


Рис. 2. Дифрактограмма исследуемого образца

Электронная Оже-спектроскопия (ЭОС). ЭОС анализ выполнялся пучком электронов с энергией 3 кэВ под углом 60° .

Результаты анализа оже-спектров экспериментальных образцов позволяют утверждать, что тонкий слой никелевой пленки лежал непосредственно на естественном окисле кремния, а проведенное осаждение углерода привело к формированию наноуглеродной пленки на поверхности никеля (рис. 3).

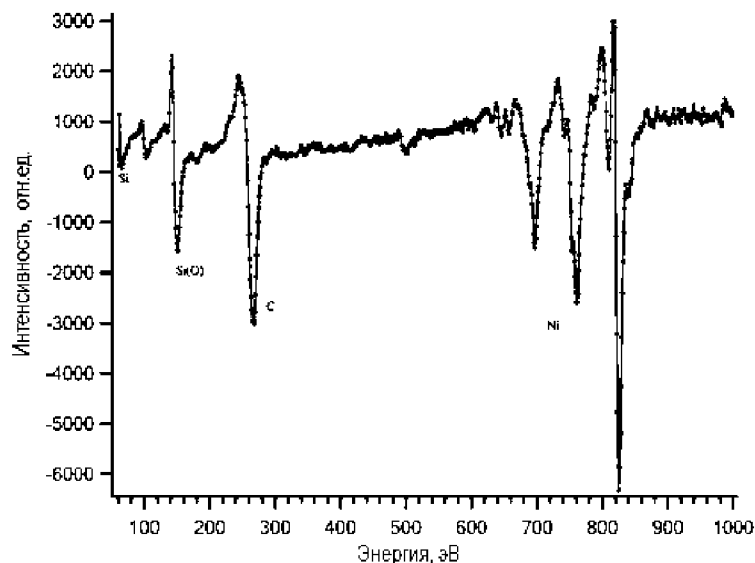


Рис. 3. Оже-спектр образца после проведения CVD процесса

На оже-спектре углерода (рис. 4b) присутствует слабовыраженная «полочка» при энергиях около 270 эВ, которая, согласно данным работы [2], свойственна спектру графена толщиной менее 5–6 слоев, независимо от металла подложки (рис. 4a). Это позволяет утверждать, что на основной поверхности образцов был сформирован мультиграфеновый слой толщиной более 5, но менее 10 слоев.

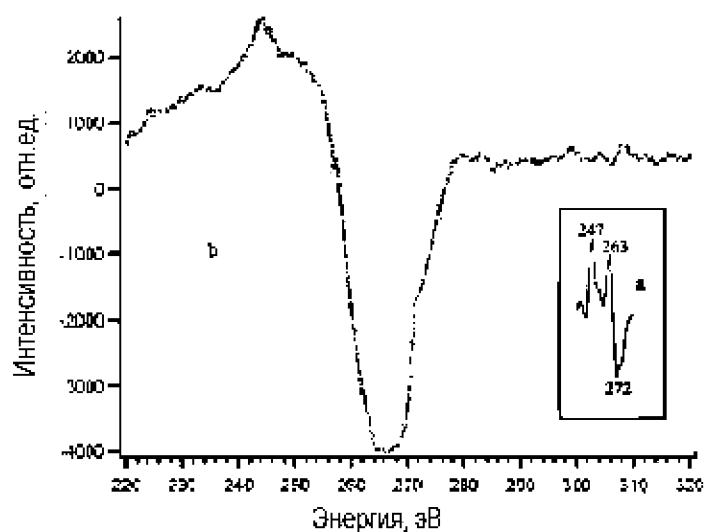


Рис. 4: а – Оже-спектр монослойного графена [2], б – Оже-спектр углерода на поверхности образца

Отражательно-абсорбционная электронная спектроскопия. Спектральная характеристика в УФ и видимом диапазоне определялась на спектрально-измерительном комплексе для изучения электронных спектров отражения/поглощения на базе спектрометра ST-7015 (UV/Vis), ST-1215(IR).

Удачный синтез мультиграфена был подтвержден полученными спектрами в УФ-видимом диапазоне (рис. 5). На спектрах показан пик поглощения в области $\lambda = 250$ нм, который соответствует π - π^* переходам ароматических связей С-С.

Широко известно, что носители заряда в графене обладают очень высокой подвижностью, а их движение описывается двумерным уравнением Дирака, а не уравнением Шредингера, как в объемных полупроводниках [8]. Нулевая запрещенная зона и линейный закон дисперсии энергии электронов обеспечивают графену плоский спектр в широком диапазоне от УФ до ИК. В нашем случае наличие широкого пика поглощения в видимой области спектра, очевидно, вызвано влиянием Ni подложки и дефектами структуры мультиграфена.

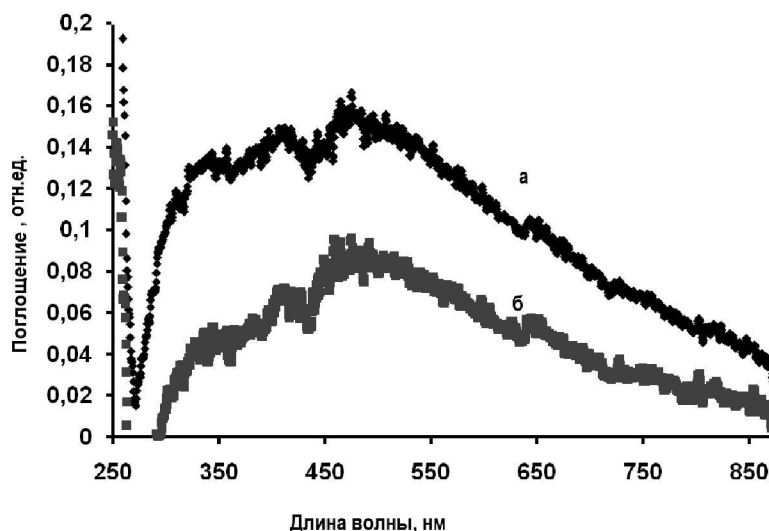


Рис. 5. Спектры образца в УФ-видимом диапазоне:
а – основная поверхность мультиграфеновой пленки, б – хлопьевидные области

В ходе исследования было выявлено, что увеличение количества слоев мультиграфена приводит к росту поглощения, однако профиль спектра при этом не изменяется (рис. 5). Поскольку коэффициент поглощения монослоя графена составляет примерно 2,3 % и определяется исключительно постоянной тонкой структуры [3], то прозрачность полученной мультиграфеновой пленки указывает на среднее число слоев в ней от 7–8 в основной области и 3–4 слоя в хлопьевидных островах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электронная Оже-спектроскопия и отражательно-абсорбционная электронная спектроскопия показали, что сформированный методом CVD мультиграфен на тонких пленках никеля имеет неравномерное распределение количества слоев. В целом мультиграфен имеет 7–8 слоев, за исключением отдельных хлопьевидных областей толщиной в 3–4 слоя. Профили спектров УФ-видимого диапазона не зависят от количества слоев. Отклонение от характерного свободного графену плоского спектра объясняется влиянием Ni подложки и дефек-

тами структуры мультиграфена. Высокая пропускная способность мультиграфена в УФ и видимом диапазоне делает актуальным его практическое применение в оптоэлектронике.

Список литературы

1. Булатова А. Н. CVD синтез и исследование характеристик мультиграфеновых пленок / А. Н. Булатова, М. Ф. Булатов, Д. В. Старов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 2 (14). – С. 100–103.
2. Рут'ков Е. В. Фазовый переход графен – графит на поверхности науглероженного металла / Е. В. Рут'ков, А. В. Кузьмичев, Н. Р. Галь // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 93 (3). – С. 166–170.
3. Avouris P. Carbon-nanotube photonics and optoelectronics / P. Avouris, M. Freitag, V. Perebeinos // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 2 (6). – P. 341–350.
4. Bao Q. Atomic-Layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers / Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, Y. Yan, Z. X. Shen, K. P. Loh, G.Y. Tang // Adv. Funct. Mater. – 2009. – Vol. 19. – P. 1–7.
5. Bhandari S. Revelation of graphene-Au for direct write deposition and characterization / S. Bhandari, M. Deepa, A. G. Joshi, A. P. Saxena, A. K. Srivastava // Nanoscale Research Letters. – 2011. – Vol. 6. – P. 424–427.
6. Bonaccorso F. Graphene photonics and optoelectronics / F. Bonaccorso, F. Z. Sun, T. Hasan, A. C. Ferrari // Nature Photon. – 2010. – Vol. 4. – P. 611–616.
7. Ghosh S. Heat conduction in graphene: Experimental study and theoretical interpretation / S. Ghosh, D. L. Nika, E. P. Pokatilov, A. A. Balandin // New Journal of Physics. – 2009. – Vol. 11. – P. 095012 (1–19).
8. Nair R. R. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene / R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim // Science. – Vol. 320. – 1308–1315.
9. Novoselov K. S. Electric field effect in atomically thin carbon films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666–669.
10. Set S. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes / S. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, M. Jablonski // Journal of Lightwave Tech. – 2004. – Vol. 22 (1). – P. 51–56.
11. Slonczewski J. L. Band structure of graphite / J. C. Slonczewski, P. R. Weiss // Phys. Rev. – 1958. – Vol. 109 (2). – P. 272–279.
12. Wallace P. R. The band theory of graphite / P. R. Wallace // Phys. Rev. – 1947. – Vol. 71. – P. 622–634.

References

1. Bulatova A. N. CVD sintez i issledovanie harakteristik mul'tigrafenovyh plenok / A. N. Bulatova, M. F. Bulatov, D. V. Starov // Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii. – 2011. – № 2 (14). – S. 100–103.
2. Rut'kov E. V. Fazovyi perehod grafen – grafit na poverhnosti nauglerozhennogo metalla / E. V. Rut'kov, A. V. Kuz'michev, N. R. Gal' // Pis'ma v ZhETF. – 2011. – T. 93 (3). – S. 166–170.
3. Avouris P. Carbon-nanotube photonics and optoelectronics / P. Avouris, M. Freitag, V. Perebeinos // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 2 (6). – P. 341–350.
4. Bao Q. Atomic-Layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers / Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, Y. Yan, Z. X. Shen, K. P. Loh, G. Y. Tang // Adv. Funct. Mater. – 2009. – Vol. 19. – P. 1–7.
5. Bhandari S. Revelation of graphene-Au for direct write deposition and characterization / M. Deepa, A. G. Joshi, A. P. Saxena, A. K. Srivastava // Nanoscale Research Letters. – 2011. – Vol. 6. – P. 424–427.
6. Bonaccorso F. Graphene photonics and optoelectronics / F. Bonaccorso, F. Z. Sun, T. Hasan, A. C. Ferrari // Nature Photon. – 2010. – Vol. 4. – P. 611–616.
7. Ghosh S. Heat conduction in graphene: Experimental study and theoretical interpretation / S. Ghosh, D. L. Nika, E. P. Pokatilov, A. A. Balandin // New Journal of Physics. – 2009. – Vol. 11. – P. 095012 (1–19).

8. Nair R. R. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene / R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim // Science. – Vol. 320. – P. 1308–1315.
9. Novoselov K. S. Electric field effect in atomically thin carbon films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666–669.
10. Set S. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes / S. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, M. Jablonski // Journal of Lightwave Tech. – 2004. – Vol. 22 (1). – P. 51–56.
11. Slonczewski J. L. Band structure of graphite / J. C. Slonczewski, P. R. Weiss // Phys. Rev. – 1958. – Vol. 109 (2). – P. 272–279.
12. Wallace P. R. The band theory of graphite / P. R. Wallace // Phys. Rev. – 1947. – Vol. 71. – P. 622–634.

УДК 621.382

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
НИЗКОВОЛЬТНОГО ТРАНЗИСТОРА
С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ**

Шахмаева Айшат Расуловна, кандидат технических наук, Дагестанский государственный технический университет, 367015, Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Шамиля, 70, e-mail: fpk12@mail.ru.

Захарова Патимат Расуловна, аспирант, Дагестанский государственный технический университет, 367015, Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Шамиля, 70, e-mail: patimatzakharova@gmail.com.

В статье рассматриваются особенности процесса изготовления биполярных транзисторов с изолированным затвором (БИТЗ или IGBT). По предлагаемой модернизированной технологии изготовлен отечественный аналог транзистора MGP20N40CL фирмы Motorola. Программным методом получены его топология и конструкция. Оптимизированная структура смоделирована с помощью приборно-технологического комплекса программ фирмы Synopsys. Предложенная технология представляет особый интерес тем, что позволяет формировать наноразмерные слои в структуре топологии изготавливаемого прибора: процессы формирования областей затворов происходят на подложке с двойным слоем эпитаксиального наращивания. Такой подход к технологии создания и формированию каналов позволил на меньшей площади кристалла разместить большее число затворов. Результатом проведенных исследований является микроминиатюризация прибора до размеров, меньших в 5 раз размеров аналога фирмы Motorola.

Рассмотрены и выявлены особенности получаемого кристалла транзистора: его размеры, электрические показатели и выходные характеристики. Также немаловажное значение имеет коммерческая составляющая производства приборов по предложенной нами технологии – увеличение процента выхода годных кристаллов и большее количество (в несколько раз) кристаллов на одной пластине. В работе также указаны недостатки и преимущества продукта.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, выходные характеристики, МОП-структура, кристалл, мезапланарная технология, плазмохимическая зачистка, ионное легирование.