

УДК 538.9

## ГОФРИРОВАННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОМЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ НАПРЯЖЁННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР: ФОРМИРОВАНИЕ И МАГНИТОТРАНСПОРТ

© В. А. Селезнев, С. В. Голод, А. Б. Воробьёв, Е. В. Козик,  
А. В. Принц, В. Я. Принц

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: golod@isp.nsc.ru*

Работа посвящена фундаментальным исследованиям в области наномеханики гофрированных полупроводниковых наномембран из напряжённых гетероструктур. Приводятся результаты исследования магнитотранспорта двумерного электронного газа в гофрированной наномембране из гетероплёнки GaAs/InGaAs.

*Ключевые слова:* наномембрана SiGe/Si, гофрировка, трёхмерные микро- и наноблочки, магнитотранспорт.

DOI: 10.15372/AUT20240406

EDN: LUFVVI

**Введение.** Прецизионное наноструктурирование является нерешённой ключевой проблемой нанотехнологии. Достижение прецизионных размеров в квантовых приборах необходимо как для организации массового производства, так и для правильного функционирования приборов, поскольку процессы туннелирования, размерное квантование и т. д. строго связаны с размерами.

В начале 2000-х гг. в группе исследователей под руководством профессора В. Я. Принца был разработан новый подход для формирования твердотельных трёхмерных наноблочков различной геометрии. Подход основан на отделении от подложки тонких напряжённых плёнок, которые под действием внутренних напряжений преобразовывались в трубки, спирали, кольца, гофрировки [1–7]. Разработаны основы технологий, и созданы разнообразные трёхмерные микро- и наноблочки из полупроводников, металлов и диэлектриков GaAs/InGaAs, SiGe/Si, InSbAs/InAs, SiGe/Si/Cr, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> и др. Особенностью данного подхода является не только возможность достижения малых размеров, но и достижение прецизионности в размерах и форме. Для этого в качестве исходных используются плоские структуры, выращенные с помощью молекулярной эпитаксии. В результате создано новое направление, которое поддержано на международном уровне исследованиями в ведущих лабораториях Японии, Германии, Швейцарии, Китая и США.

Одним из наиболее интересных тонкоплёночных трёхмерных нанобъектов для исследований и практических применений являются гофрированные наномембраны. В пионерской работе [8] было показано, что гофрированная наноплёнка InAs содержит последовательность сильно сжатых и растянутых локальных участков, формирующих систему глубоких потенциальных ям. Такую систему можно рассматривать как систему квантово-размерных объектов, энергетическую структуру которых можно контролируемо задавать с помощью периода гофрировки. Гофрированная плёнка с двумерным электронным газом могут рассматриваться как новый объект квантовой физики [9]. Свойства гофрированных плёнок, помещённых в магнитное поле, будут принципиально отличаться от свойств

плоских плёнок. Например, в гофрированных плёнках с электронным газом, помещённых в сильное магнитное поле, перпендикулярное гофрировке, положение уровней Ландау будет сильно зависеть от координаты. Это связано с тем, что в изогнутой плёнке составляющая магнитного поля, перпендикулярная поверхности, меняется с координатой. Модуляция энергии уровней Ландау вдоль гофрированной плёнки приведёт к периодической модуляции плотности носителей заряда и тока.

Другим интересным примером использования гофрировок является идея создания твердотельного аналога ондулятора для электронов. В работах [10–13] теоретически исследовано движение носителей заряда по синусоидальной траектории через гофрированные наноструктуры из плёнок SiGe/Si или графена. В результате происходило излучение электромагнитных волн в терагерцевом диапазоне из-за изменения скорости носителей заряда аналогично случаю генерации синхротронного излучения.

Области практических применений твердотельных гофрированных наномембран разнообразны: они могут быть использованы, например, в качестве элементов мощных электростатических наномоторов [14] или оптоэлектронных приборов [15, 16]. К настоящему времени методы формирования гофрированных наномембран, принципы организации и расчёты механических свойств, включая полимерные подложки, а также их практические применения, подробно рассмотрены в обзорах [17–20].

В работе представлены результаты фундаментальных исследований в области формирования гофрированных полупроводниковых наномембран SiGe/Si, а также результаты исследования магнитотранспорта двумерного электронного газа в гофрированной наномембране из гетероплёнки GaAs/InGaAs.

#### Формирование гофрированных полупроводниковых наномембран SiGe/Si.

В предыдущих наших работах [7, 21] продемонстрировано, что на основе напряжённых плёнок SiGe/Si/Cr возможно формирование прецизионных гибридных металл-полупроводниковых оболочек. В предлагаемой работе сформированы гофрированные системы из напряжённых эпитаксиальных плёнок SiGe/Si, закреплённых между подвешенными балками SiGe/Si/Cr (рис. 1, *a*). На первом этапе изготовления методом химического осаждения из газовой фазы с предварительной откачкой реактора до сверхвысокого вакуума на Si-подложке *n*-типа ориентации (001) при температуре 550 °C была выращена сильнолегированная бором ( $p^+ = 1-2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) гетероструктура  $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}$  (12/8 нм).

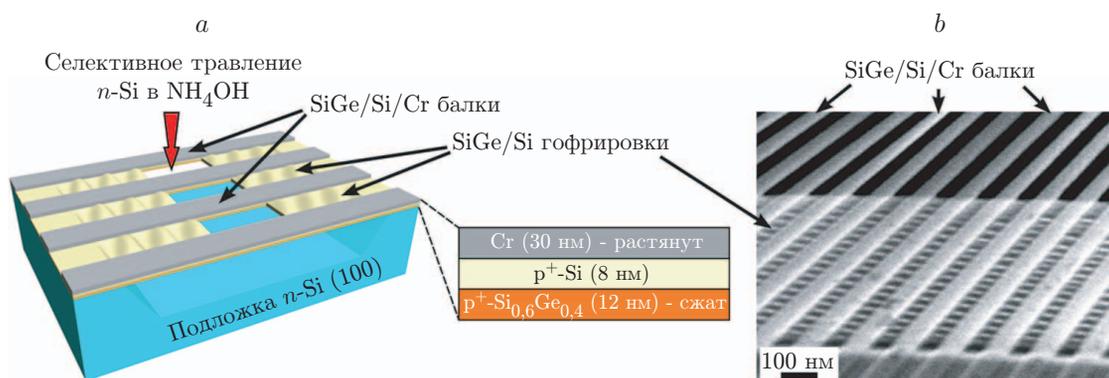


Рис. 1. *a* — схематичная иллюстрация процесса формирования гофрированных систем из напряжённых эпитаксиальных плёнок SiGe/Si, закреплённых между подвешенными балками SiGe/Si/Cr; *b* — СЭМ-изображение (под углом к поверхности) массива подвешенных наногофрированных мембран  $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}$ , сформированных из трёхслойной плёнки  $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}/\text{Cr}$  (12/8/30 нм)

Чтобы исключить релаксацию твёрдого раствора через формирование дислокаций, толщина псевдоморфного слоя SiGe была выбрана ниже критической толщины. Затем на гетероструктуру  $p^+$ -Si<sub>0,6</sub>Ge<sub>0,4</sub>/Si термовакuumным испарением со скоростью 5 нм/мин при рабочем давлении  $10^{-6}$  торр осаждался слой Cr толщиной 30 нм. Выбор хрома в качестве верхнего металлического слоя определялся тем, что технология его применения в электронной литографии хорошо отработана, он практически не травится в щелочных травителях и имеет сильные внутренние деформации растяжения при осаждении на кремний [22]. Для создания первого маскирующего рисунка в виде параллельных микро- и нанополос (см. рис. 1, *a*) в исходной планарной структуре использовалась электронная литография. После проявки электронрезиста рисунок переносился на нижележащую плёнку Cr с помощью реактивного ионного травления в смеси Cl<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>. Затем методом оптической литографии и последующим SF<sub>6</sub> (CHF<sub>3</sub> + O<sub>2</sub>) реактивным ионным травлением в  $p^+$ -SiGe/Si формировались окна для доступа селективного травителя к низколегированной жертвенной подложке кремния. После удаления фоторезиста с поверхности образца структурированная напряжённая плёнка SiGe/Si/Cr отсоединялась от подложки (см. рис. 1, *a*) с помощью селективного (8000) травления нижележащей жертвенной подложки кремния в 3,7 % водном растворе NH<sub>4</sub>OH [23]. Ранее в [2, 7] нами было определено, что из отсоединённых данным способом от подложки кремния полупроводниковых SiGe/Si и гибридных металл-полупроводниковых напряжённых плёнок SiGe/Si/Cr формируются прецизионные тонкоплёночные микро- и наноболочки. Исследования показали [7, 21], что при соблюдении технологических условий нанесения металла можно добиться воспроизводимости величины его внутренних механических напряжений, что позволяет контролировать радиус кривизны изгиба гибридных трёхмерных структур. Для плёнок хрома толщиной 20 нм, полученных термовакuumным испарением, значения упругой деформации составили 1 % [7], что согласуется с литературными данными [24]. Следует отметить, что при отсоединении плёнки SiGe/Si/Cr от подложки в каждом из слоёв начинают перераспределяться механические напряжения. Сжатый нижний слой германия—кремния начинает растягиваться, а растянутый слой хрома сжиматься, что способствует процессу сворачивания многослойной плёнки. В представленной работе впервые демонстрируется возможность формирования из плёнок SiGe/Si/Cr подвешенных структурированных мембран, состоящих из плоских балок-мостиков и закреплённых между ними микро- и нанопоффрировок SiGe/Si. Известно [6, 25], что, если сжатую плёнку отсоединить от подложки, то она выпучивается, и из неё формируются гофрированные системы с различной трёхмерной конфигурацией [26]. Предотвратить гофрирование мембраны из изначально сжатой плёнки можно добавлением дополнительного компенсирующего растянутого слоя. В нашем случае в качестве такого компенсирующего слоя выступает растянутая плёнка хрома. Таким образом, в результате селективного удаления жертвенной подложки кремния из узких полосок SiGe/Si/Cr, прикреплённых с двух сторон к подложке, формируются плоские балки-мостики. В то же время закреплённая между балками напряжённая двухслойная плёнка  $p^+$ -SiGe/Si трансформируется в гофрированную мембрану (см. рис. 1, *a*).

После завершения формирования гофрированных наномембран образцы без извлечения на воздух тщательно промывались в деионизированной воде и затем помещались в изопропиловый спирт. Для уменьшения влияния поверхностного натяжения образцы извлекались из горячего спирта, что позволило заметно снизить эффект капиллярного залипания подвешенных гофрировок к поверхности образца и улучшить воспроизводимость технологического процесса. На рис. 1, *b* показано изображение подвешенных нанопоффрировок Si<sub>0,6</sub>Ge<sub>0,4</sub>/Si (12/8 нм), полученное на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Период нанопоффрировки SiGe/Si равен 80 нм при расстоянии между балками SiGe/Si/Cr 100 нм.

При рассмотрении задачи теории упругости для нахождения формы гофрированных

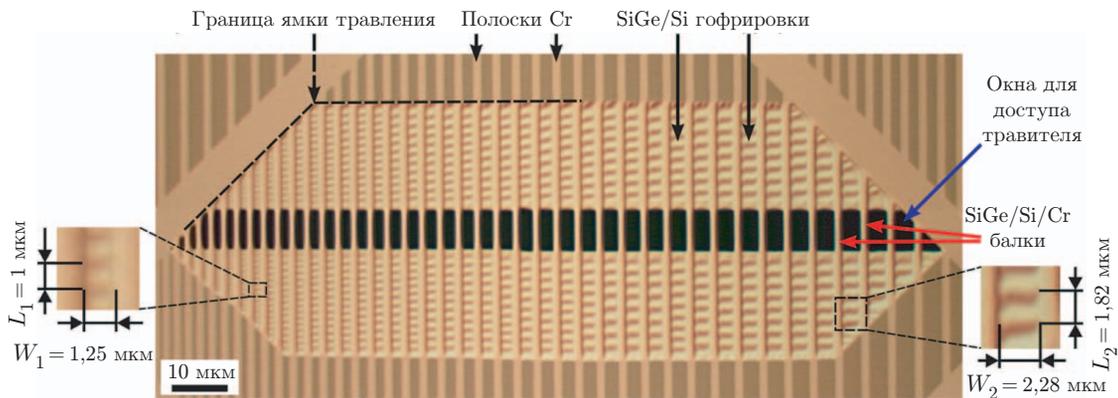


Рис. 2. Микрофотография массивов подвешенных гофрировок SiGe/Si с различными периодами в зависимости от расстояния между балками SiGe/Si/Cr. Толщины эпитаксиальных слоёв  $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}$  и плёнки Cr составляют 12/8 и 30 нм соответственно. На вставках показаны увеличенные фрагменты структуры, отмеченные на микрофотографии пунктирными прямоугольниками. Обозначения  $L_i$  и  $W_i$  соответствуют периодам гофрировок и расстояниям между балками

плёнок используется нелинейная теория пластин Фёшля — фон Кармана [27]. В работе [26] рассмотрено решение данной задачи для двухосносжатых тонких плёнок, жёстко закреплённых между двумя держателями. Данная конфигурация полностью аналогична нашей системе с гофрированными наномембранами SiGe/Si, закреплёнными между балками SiGe/Si/Cr. В [26] получены зависимости  $L$  — периода гофрированной мембраны — от  $W$  — расстояния между держателями. В случае плёнок SiGe/Si, имеющих коэффициенты Пуассона 0,27, расчётное значение отношения  $L/W = 0,8$ . С целью получения экспериментальной зависимости  $L/W$  для гофрированных наномембран SiGe/Si нами была разработана оригинальная конфигурация литографической мезаструктуры с постепенно изменяющимся расстоянием между полосками хрома (рис. 2). На микрофотографии хорошо видно, что с увеличением расстояния между балками линейно увеличивается период гофрировок SiGe/Si. На вставках рис. 2 показаны увеличенные фрагменты гофрировок с периодами, отличающимися в 1,82 раза. Полученные значения отношений  $L_1/W_1 = L_2/W_2 = 0,8$ , что согласуется с расчётным значением [26]. Следует отметить, что похожая зависимость периода к ширине подвешенной напряжённой плёнки (глубине подтравки жертвенного слоя под плёнку) наблюдается и для гофрировок, закреплённых на подложке только вдоль одного края [28]. Кроме того, экспериментальные результаты и теоретический анализ гофрированных плёнок данного типа показал [6, 29, 30], что с увеличением деформации сжатия исходной эпитаксиальной плёнки растёт амплитуда гофрировок, а период, наоборот, уменьшается. В то же время увеличение толщины плёнки при заданных значениях деформации и ширины подвешенной плёнки приводит к увеличению периода и амплитуды гофрировки [31]. Таким образом, контролируя толщину и упругие напряжения сжатия в эпитаксиальной плёнке SiGe/Si, а также задавая расстояние между балками, можно управлять параметрами подвешенных гофрированных наномембран.

**Магнитотранспорт в наномембране из гетероплёнки GaAs/InGaAs с двумерным электронным газом.** Многослойная гетероструктура, используемая в данной работе, была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs ориентации (100). Она содержала жертвенный слой AlAs толщиной 50 нм, напряжённый слой  $\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$  толщиной 20 нм, квантовую яму GaAs шириной 13 нм, ограниченную барьерами из легированных кремнием сверхрешёток GaAs/AlAs и содержащую двумерный

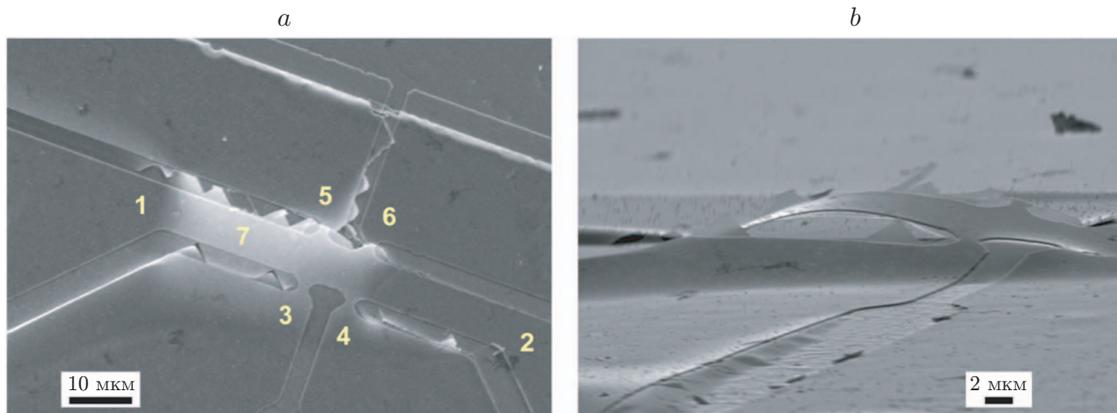


Рис. 3. СЭМ-изображения гофрированной наномембраны толщиной 192 нм: *a* — вид под прямым углом к плоскости образца, *b* — под некоторым малым углом к плоскости образца. Цифрами обозначены: 1, 2 — токовые контакты, 3–6 — потенциальные контакты, 7 — канал холловского изогнутого мостика

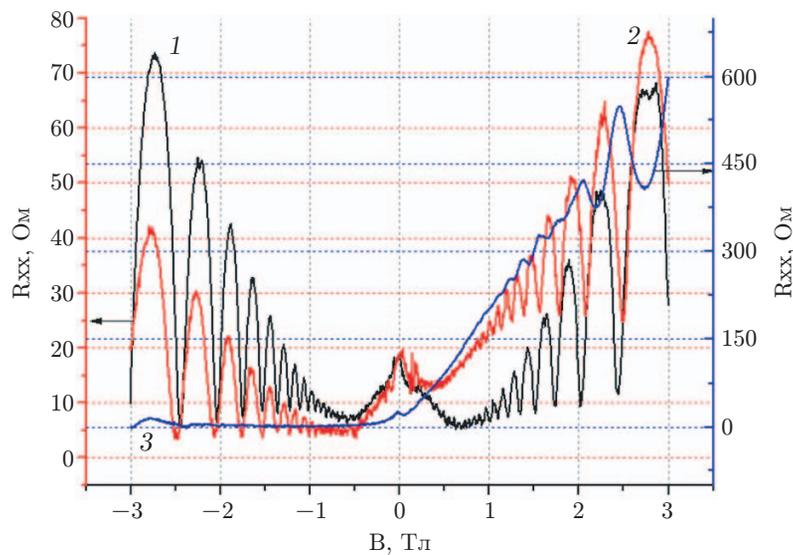


Рис. 4. Зависимости магнитосопротивления: 1 — плоский образец; 2 — трубка; 3 — гофрировка; зависимости 1, 2 — левая ось; зависимость 3 — правая ось

электронный газ (ДЭГ). Жертвенный и напряжённый слои давали возможность формирования из структур цилиндрических или гофрированных оболочек. Общая толщина отделяемой плёнки составляла 192 нм. На исходной плоской гетероструктуре с помощью оптической литографии и жидкостного травления были изготовлены мезоструктуры в форме холловского мостика с длиной и шириной канала 32 и 8 мкм соответственно, и выполнены измерения продольного сопротивления в магнитном поле до 3 Тл при температуре 4,2 К. После этого селективным травлением жертвенного слоя плёнка с квантовой ямой была отделена от подложки. При этом были сформированы цилиндрические и гофрированные оболочки. Более подробно процедура формирования оболочек с контактами описана в [32]. На рис. 3 показаны изображения гофрированной оболочки, на которой было измерено продольное сопротивление оболочек при тех же условиях, что и для плоских образцов. На рис. 4 приведены зависимости  $R_{xx}(B)$  для плоского образца и двух видов наномембран.

Из полученных зависимостей (см. рис. 4) было установлено следующее:

— определены концентрация и подвижность ДЭГ в плоском образце (рис. 4, кривая 1),  $n_S = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu = 8 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;

— в образце имеется один проводящий канал, так как осцилляции Шубникова — де Гааза имеют единственный период, а концентрация ДЭГ, определённая из осцилляций, совпадает с холловской концентрацией;

— определены концентрация и подвижность ДЭГ в микротрубке  $n_S = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu = 5,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ; уменьшение подвижности связано с появлением второй поверхности освобождённой плёнки, т. е. дополнительного рассеивающего потенциала;

— асимметрию продольного сопротивления свёрнутого образца по полю (рис. 4, кривая 2) можно объяснить наличием продольной компоненты градиента магнитного поля [32]. Наиболее вероятно, что при травлении и сворачивании плёнка деформировалась таким образом, что градиент нормальной к поверхности компоненты вектора магнитного поля направлен не только поперёк протекающего через образец тока, но и вдоль него.

Измерения на гофрировке (рис. 4, кривая 3) показали более выраженную асимметрию продольного сопротивления, чем измерения на микротрубке, что объясняется меньшим радиусом кривизны гофрировки и, как следствие, — большим градиентом магнитного поля;

— из осцилляций определено наличие ДЭГ в гофрированной плёнке с теми же параметрами, что и у микротрубки:  $n_S = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu = 5,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

Таким образом, в данной работе измерены основные параметры электронного переноса, подвижность и концентрация носителей заряда в образцах различного радиуса кривизны из одной и той же гетероструктуры с ДЭГ (плоском образце, микротрубке и гофрировке); приведено качественное объяснение наблюдаемых явлений.

**Заключение.** В работе представлены результаты фундаментальных исследований в области наномеханики гофрированных полупроводниковых наномембран из SiGe/Si гетероструктур. Продемонстрированы возможности управления периодами гофрировок в диапазоне от нескольких микрометров до 100 нм. Выполнены сравнительные исследования магнитотранспорта в трубчатой и гофрированной наномембранах с ДЭГ и в исходной плоской гетероструктуре. Ярко выраженная асимметрия продольного сопротивления в гофрировке связана с меньшим радиусом кривизны и, как следствие, — большим градиентом магнитного поля.

**Финансирование.** Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K. et al.** Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2000. **6**, Iss. 1–4. P. 828–831.
2. **Golod S. V., Prinz V. Ya., Mashanov V. I., Gutakovsky A. K.** Fabrication of conducting GeSi/Si micro- and nanotubes and helical microcoils // *Semiconductor Sci. and Technol.* 2000. **16**, N 3. P. 181–185.
3. **Prinz V. Ya.** Three-dimensional self-shaping nanostructures based on free stressed heterofilms // *Rus. Phys. Journ.* 2003. **46**, N 6. P. 568–576.
4. **Prinz V. Ya.** A new concept in fabricating building blocks for nanoelectronic and nanomechanic devices // *Microelectron. Eng.* 2003. **69**, Iss. 2–4. P. 466–475.
5. **Prinz V. Ya.** Precise semiconductor nanotubes and nanoshells fabricated on (110) and (111) Si and GaAs // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2004. **23**, Iss. 3–4. P. 260–268.

6. **Prinz V. Ya.** Precise semiconductor nanotubes and nanocorrugated quantum systems // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2004. **24**, Iss. 1–2. P. 54–62.
7. **Принц В. Я., Голод С. В.** Упругие нанооболочки на основе кремниевых плёнок: формирование, свойства и практическое применение // *Прикладная механика и техническая физика*. 2006. **47**, № 6. С. 114–128.
8. **Osadchii V. M., Prinz V. Y.** Quantum confinement in nanocorrugated semiconductor films // *Phys. Rev. B*. 2005. **72**, Iss. 3. 033313. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.033313.
9. **Принц В. Я.** Квантовые и поверхностные свойства свободных плёнок и нанооболочек молекулярных и атомарных толщин // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2008. № 1. С. 15–22.
10. **Fedorchenko A. I., Cheng H. H., Sun G., Soref R. A.** Radiation emission from wrinkled SiGe/SiGe nanostructure // *Appl. Phys. Lett.* 2010. **96**, Iss. 11. P. 16–19.
11. **Fedorchenko A. I., Cheng H. H., Wang W.-C.** On the potential application of the wrinkled SiGe/SiGe nanofilms // *World Journ. Mechanics*. 2016. **6**, N 2. P. 19–23.
12. **Anwar F., Carlos C. R., Saraswat V. et al.** Nanoscale graphene/Ge wigglers as building blocks for THz sources // *AIP Adv.* 2017. **7**, Iss. 11. 115015. DOI: 10.1063/1.4986513.
13. **Kerjouan R., Riccardi E., Huang P. et al.** Synchrotron-like THz emitters based on corrugated graphene // *Proc. of the 45th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. Buffalo, USA, 8–13 Nov., 2020. P. 268–269.
14. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Prinz A. V. et al.** 3D heterostructures and systems for novel MEMS/NEMS // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2009. **10**, Iss. 3. 034502. DOI: 10.1088/1468-6996/10/3/034502.
15. **Kang P., Wang M. C., Knapp P. M., Nam S.** Crumpled graphene photodetector with enhanced, strain-tunable, and wavelength-selective photoresponsivity // *Adv. Mater.* 2016. **28**, Iss. 23. P. 4639–4645.
16. **Deng S., Berry V.** Wrinkled, rippled and crumpled graphene: An overview of formation mechanism, electronic properties, and applications // *Mater. Today*. 2016. **19**, Iss. 4. P. 197–212.
17. **Mei Y., Kiravittaya S., Harazim S., Schmidt O. G.** Principles and applications of micro and nanoscale wrinkles // *Mater. Sci. and Eng. R: Rep.* 2010. **70**, Iss. 3–6. P. 209–224.
18. **Cheng X., Zhang Y.** Micro/nanoscale 3D assembly by rolling, folding, curving, and buckling approaches // *Adv. Mater.* 2019. **31**, Iss. 36. 1901895. DOI: 10.1002/adma.201901895.
19. **Guo Q., Di Z., Lagally M. G., Mei Y.** Strain engineering and mechanical assembly of silicon/germanium nanomembranes // *Mater. Sci. and Eng. R: Rep.* 2018. **128**. P. 1–31. DOI: 10.1016/j.mser.2018.02.002.
20. **Truong T.-A., Nguyen T.-K., Zhao H. et al.** Engineering stress in thin films: An innovative pathway toward 3D micro and nanosystems // *Small*. 2022. **18**, Iss. 4. 2105748. DOI: 10.1002/smll.202105748.
21. **Golod S. V., Prinz V. Y., Wägli P.** Freestanding SiGe/Si/Cr and SiGe/Si/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/Cr microtubes // *Appl. Phys. Lett.* 2004. **84**, Iss. 17. P. 3391–3393.
22. **Thornton J. A., Hoffman D. W.** Stress-related effects in thin films // *Thin Solid Films*. 1989. **171**, Iss. 1. P. 5–31.
23. **Schnakenberg U., Benecke W., Löchel D.** NH<sub>4</sub>OH-based etchants for silicon micromachining // *Sens. and Actuators A: Phys.* 1990. **23**, Iss. 1–3. P. 1031–1035.
24. **Elstner F., Gautier C., Piot O. et al.** Comparative study of the stress in chromium films deposited by vacuum arc evaporation, vacuum evaporation, and DC magnetron sputtering // *Physica Status Solidi A*. 1996. **154**, Iss. 2. P. 669–679.

25. **Prinz V. Ya.** Precise, molecularly thin semiconductor shells: From nanotubes to nanocorrugated quantum systems // *Physica Status Solidi B*. 2006. **243**, Iss. 13. P. 3333–3339.
26. **Audoly B.** Stability of straight delamination blisters // *Phys. Rev. Lett.* 1999. **83**, Iss. 20. P. 4124–4127.
27. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика: Учеб. пособ. для вузов. В 10 т. Т. VII. Теория упругости. 5-е изд. М.: Физматлит, 2003. 264 с.
28. **Fedorchenko A. I., Wang A.-B., Mashanov V. I. et al.** Strain-induced wrinkling on SiGe free standing film // *Appl. Phys. Lett.* 2006. **89**, Iss. 4. P. 2004–2007.
29. **Cendula P., Kiravittaya S., Mei Y. F. et al.** Bending and wrinkling as competing relaxation pathways for strained free-hanging films // *Phys. Rev. B*. 2009. **79**, Iss. 8. 085429. DOI: 10.1103/PhysRevB.79.085429.
30. **Fedorchenko A. I., Wang A.-B., Mashanov V. I., Cheng H.-H.** Wrinkling of a debonded initially compressed  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  Film // *Journ. Mechanics*. 2005. **21**, Iss. 3. P. 131–135.
31. **Annabattula R. K., Veenstra J. M., Mei Y. F. et al.** Self-organization of linear nanochannel networks // *Phys. Rev. B*. 2010. **81**, Iss. 22. 224114. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.224114.
32. **Vorob'ev A. B., Friedland K.-J., Kostial H. et al.** Giant asymmetry of the longitudinal magnetoresistance in high-mobility two-dimensional electron gas on a cylindrical surface // *Phys. Rev. B*. 2007. **75**, Iss. 20. 205309. DOI: 10.1103/PhysRevB.75.205309.

*Поступила в редакцию 22.05.2024*

*После доработки 28.06.2024*

*Принята к публикации 05.07.2024*

---