

Надточий В.А., Воронова И.В., Сыпчук Е.Ю.

<sup>1</sup> доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: kafedrafiziki2018@gmail.com, ORCID 0000-0001-9890-171X

<sup>2</sup> студентка 4 курса физико-математического факультета, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: iryna.voronova.779@gmail.com, ORCID 0000-0002-4880-752X

<sup>3</sup> студент 1 курса магистратуры физико-математического факультета, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: sypchuk\_egor@ukr.net, ORCID 0000-0003-0913-0461

## КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ И КВАНТОВЫЕ НИТИ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В представленной статье рассмотрен новый способ создания на поверхности монокристаллического германия квантовых нитей (1D структур) для приборных применений.

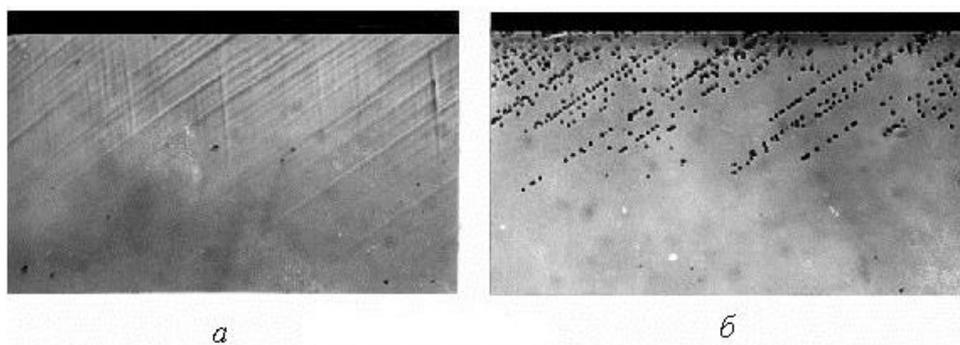
**Ключевые слова:** *квантовые нити, квантовые точки, низкоразмерные структуры, лазер, фотоэлектроника.*

### Введение

Отличительной особенностью алмазоподобных кристаллов Ge, Si, GaAs, InAs является проявление в их тонких ( $\sim 100$  мкм) приповерхностных слоях микропластичности в интервале температур (77 – 300 К) при сравнительно невысоких напряжениях (5-10 кгс/мм<sup>2</sup>) [1]. Микропластичность происходит по диффузионно-дислокационному механизму, что дает возможность управлять структурным состоянием приповерхностных слоев этих кристаллов воздействием внешних факторов. Современные методы структурного анализа полупроводников, обладающие атомарным разрешением, позволяют получать более подробную информацию о поверхностных преобразованиях в деформируемых кристаллах. С помощью атомно – силовой сканирующей микроскопии, рамановской спектроскопии комбинационного рассеяния света авторам [2,3] удалось обнаружить, что при создании в приповерхностных слоях Ge градиентов механических напряжений наблюдается массоперенос вещества вдоль поверхности и из приповерхностного слоя – вдоль линий дислокаций на поверхность. Процесс диффузионного массопереноса при  $T = 310$  К сопровождается образованием структур типа лунка – островок нанометровых размеров или массивов островков [2]. Подобные наноструктуры с размерами  $\leq 50$  нм классифицируются как квантовые точки (КТ), нашедшие широчайшие применения в полупроводниковой электронике [2-8].

## Основная часть

В данной работе впервые с использованием явления диффузионно-дислокационного механизма переноса атомов [2] были выращены наноструктуры в виде квантовых нитей (КН), ориентированных в предпочтительном направлении системой дислокаций в параллельных плоскостях скольжения типа (111) (рис. 1).

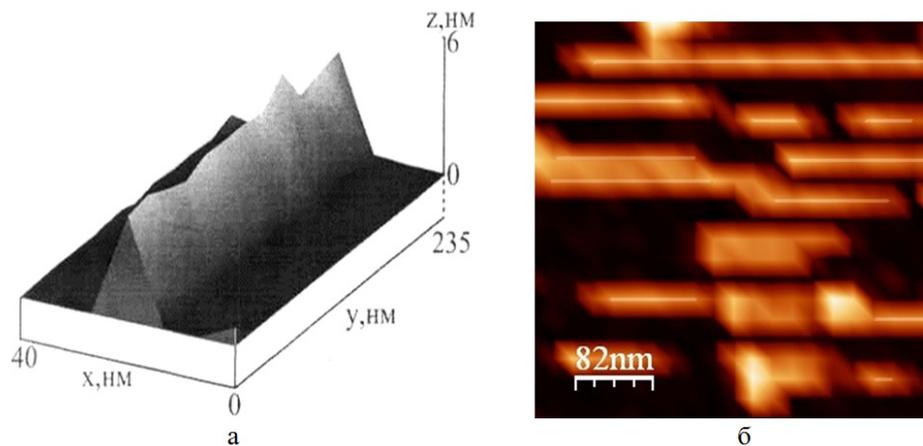


**Рис. 1:** Дислокационные структуры на поверхностях образца Ge после деформации изгиба вокруг оси [112] при напряжении  $\sigma = 10 \text{ кгс/мм}^2$ . Время выдержки под напряжением составляло 3 часа; *а* — до избирательного химического травления, *б* — после травления

Предварительно был подготовлен образец Ge прямоугольной формы для изгиба при температуре  $300^\circ\text{C}$ . Ориентация была выбрана так, чтобы во время деформации изгибом вокруг кристаллографической оси [112] действовала только одна система скольжения [9]. Для выявления дислокаций использовали химический травитель на основе водного раствора  $\text{CrO}_3$  и  $\text{HF}$  при соотношении в объемных частях 1:1, время травления составляло несколько секунд. Плотность дислокаций в плоскостях скольжения зависела от величины деформации. Точки выхода дислокаций на поверхность служили центрами зарождения островковых образований.

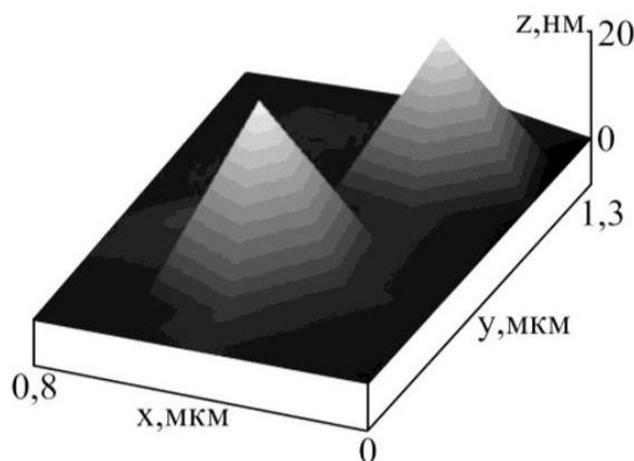
По рассмотренной методике введения дислокаций было подготовлено 5 образцов Ge в форме прямоугольных параллелепипедов размерами  $3 \times 4 \times 10 \text{ мм}$ . Эта партия образцов перед испытаниями изгибом при  $300 \text{ K}$  подвергалась только химической полировке для очистки поверхностей. Повторное деформирование образцов для выращивания нитевидных структур выполняли так же, как и при выращивании не ориентированных островков в работе [3].

Для структурных наблюдений использовали оптический микроскоп METAM – P1 и зондовый микроскоп Nanoscope IIIa Dimension 300<sup>TM</sup> (Veeco Inc). На рис. 2, *а* представлен фрагмент небольшого участка гребня, сформированного из отдельных островков после их увеличения и перекрытия. На плотно упакованных рядах дислокаций островки на определенной стадии ро-



**Рис. 2:** Наноструктуры КН, выращенные в результате действия диффузионно - дислокационного массопереноса вещества из объема кристалла вдоль линий дислокаций на поверхность; *a* — объемное изображение структуры в виде гребня, *б* — вид на ориентированные КН сверху

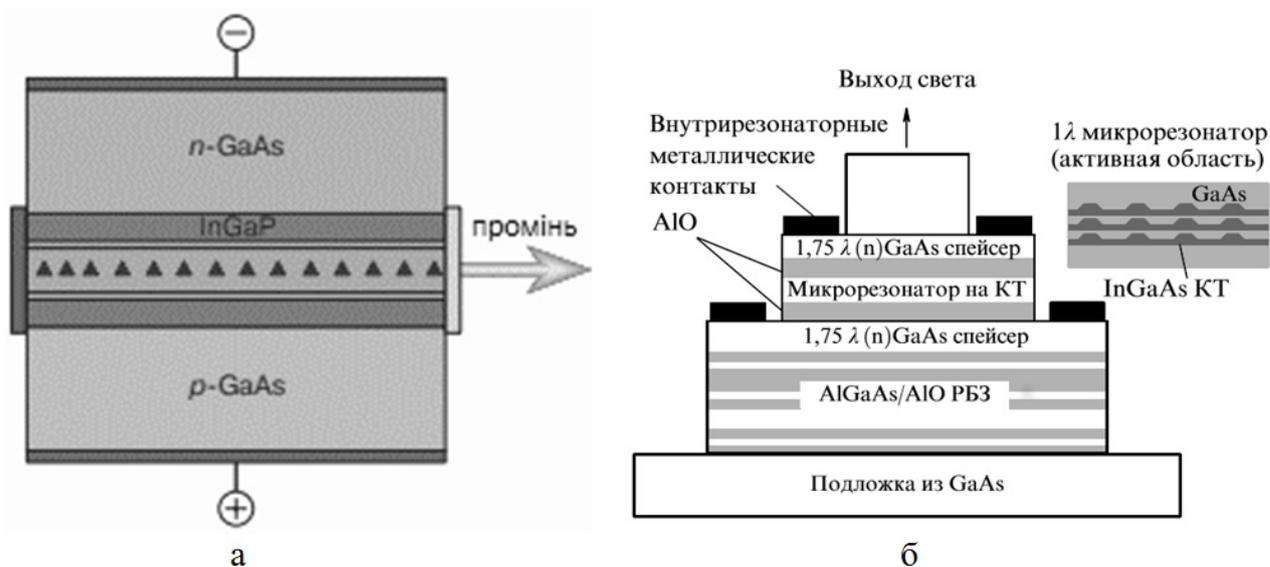
ста деформируемого образца преобразуются в завершенные гребни (КН) с постоянной высотой по длине (рис. 2, *б*). На отдельных полупетлях дислокаций с более разнесенными точками выхода на поверхность выращиваются без слияния наноструктуры (КТ) (рис. 3).



**Рис. 3:** Наноструктуры КТ, сформированные при диффузионном массопереносе вещества вдоль участков дислокационной полупетли на поверхность

Таким образом, изменяя плотность затравочных дислокаций в полосах скольжения можно управлять размерами и формой выращенных наноструктур: получать массивы ориентированных КТ или КН. Можно обратить внимание на особенность формы КТ на рис. 3: проявились отдельные террасы из совокупности атомных плотностей вследствие очень высокой разрешающей возможности атомно-силового микроскопа. Это явление нам удалось наблюдать впервые.

Применение КТ и КН. Поверхностные полупроводниковые структуры используются для разработки высокоскоростных логических элементов, преобразователей оптической энергии с высоким КПД, отражателей высокоэнергетических потоков, в нанофотонике и лазерах. На рис. 4, а показана схема лазера на СКТ. Активная область лазера с квантовыми точками встроена в  $p-n$ -переход из GaAs и ограничена с обеих сторон слоями InGaP или AlGaAs, имеющих меньший чем в GaAs показатель преломления. Эти слои образуют оптический волновод для излучения, которое распространяется в плоскости СКТ.



**Рис. 4:** а — схема инжекционного полупроводникового лазера на самоорганизованных квантовых точках (КТ); б — схематическое изображение лазера с вертикальным излучением на КТ

Торцевые грани лазера, полученные раскалыванием кристалла по плоскостям спайности и покрытые с одной стороны непрозрачным, а с другой стороны полупрозрачным зеркалом, образуют резонатор Фабри – Перо длиной около 1 мм. Через  $p-n$ -переход пропускают ток в прямом направлении, что приводит при большой плотности тока к инверсной заселенности уровней энергии и генерации излучения [10].

На рис. 4, б показано схематическое изображение более современного лазера [11]. Его основные преимущества по сравнению с первым вариантом (рис. 4, а):

- 1) отсутствие интерфейсной рекомбинации на апертуре;
- 2) уменьшение бокового растекания носителей из области апертуры.

## Выводы

В работе использован новый метод выращивания квантово-размерных структур для полупроводниковой электроники, основанный на использовании диффузионно-дислокационного массопереноса вещества при создании градиентов механических напряжений. Выращиваемые структуры из квантовых нитей и квантовых точек линейно ориентируются под действием предварительно введенных дислокаций в параллельных плоскостях скольжения, на которых наноструктуры зарождаются. Рассмотрены примеры использования КТ и КН в приборостроении.

## Литература

1. *Надточій В.О.* Мікропластичність алмазоподібних кристалів (Si, Ge, GaAs, InAs) Дис. д-ра. фіз.-мат. наук. Харків : Харківський національний ун-т ім. В.Н. Каразіна., 2006. 36 с.
2. *Надточий В.А., Уколов А.И., Алехин В.П.* Исследование поверхности деформированного монокристалла германия методом атомно-силовой микроскопии. Деформация и разрушение материалов. М. 2012. №4. С. 26-32.
3. *Уколов О.І.* Утворення дефектів та низькорозмірних атомних структур у приповерхневих шарах германію під час деформації в інтервалі температур 300–600 К. Дис. канд. фіз.-мат. наук. Харків : Харківський національний ун-т ім. В.Н. Каразіна., 2014. 20 с.
4. *Nadtochiy V., Golodenko M., Moskal D.* Investigation of dislocations in Ge single crystals by scanning electron beam. *Functional Materials*. 2004. V. 11, №1. P. 40–43.
5. *Устинов В.М.* Технология получения и возможности управления характеристиками структур с квантовыми точками. ФТП. 2004. Т. 38., Вып. 8. С. 963–970.
6. *Талочкин А.Б., Чистохин И.Б., Марков В.А.* Продольная фотопроводимость многослойных Ge/Si-структур с квантовыми точками Ge. ФТП. 2009. Т. 43., Вып. 8. С. 1034–1038.
7. *Венгреневич Р.Д., Гудыма Ю.В., Ярема С.В.* Оствальдовское созревание в условиях смешанного типа диффузии. ФТП. 2001. Т. 35., Вып. 12. С. 1440–1444.
8. *Алексеев П.А., Дунаевский М.С., Михайлов А.О. и др.* Электрические свойства GaAs нитевидных нанокристаллов, выращенных на гибридных подложках графен/SiC. ФТП. 2018. Т. 52., Вып. 12. С. 1507–1511.
9. *Родес Р.Г.* Несовершенства и активные центры в полупроводниках. М. : Металлургия, 1968. 371 с.

10. *Карпович И.А.* Квантовая инженерия: самоорганизованные квантовые точки. Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7., Вып. 11. С. 102–108.
  11. *Алферов Ж.И.* Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии. УФН. 2002. Т. 172., №9. С. 1068–1086.
- 

**Nadtochyi V.A., Voronova I.V., Sypchuk Y.Y.**

Donbas State Pedagogical University, Sloviansk, Ukraine.

**Quantum dots and quantum filaments for modern semiconductor electronics**

In the presented article, a new method is considered for creating quantum filaments (1D structures) on the surface of single-crystal germanium for instrument applications.

**Keywords:** *quantum filaments, quantum dots, low-dimensional structures, laser, photoelectronics.*