

# Структура и состав нанокompозита пористого кремния с гидроксиапатитом

С.Ю. Кулагина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

**Обоснование.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания новых эффективных биоматериалов для замещения костных дефектов. Существующие материалы часто не удовлетворяют требованиям по контролируемой биodeградации [1]. Особый интерес представляет сочетание пористого кремния (ПК), обладающего уникальными транспортными свойствами, и гидроксиапатита (ГАП) — основного минерального компонента костной ткани [2]. Однако отсутствие стандартизированных методов получения таких композитов с контролируемыми характеристиками ограничивает их клиническое применение [3].

**Цель** — разработка методики получения нанокompозита «пористый кремний–гидроксиапатит» с заданными морфологическими и функциональными свойствами.

Конкретные задачи включали:

- 1) оптимизацию параметров формирования пористой кремниевой матрицы;
- 2) исследование влияния условий лазерной обработки на характеристики получаемых частиц;
- 3) комплексную оценку свойств полученного материала.

**Методы.** Исследование проводилось с использованием комплекса современных методов. Анодное электрохимическое формирование пористого кремния осуществлялось в двухэлектродной ячейке с использованием монокристаллического кремния *p*-типа и раствора плавиковой кислоты в этиловом спирте в объемном соотношении 1:1. Пористость считали гравиметрическим методом [3]. Насыщение гидроксиапатитом проводили методом пропитки пористого слоя из водной суспензии ГАП. Лазерную абляцию выполняли на установке с волоконным лазером ( $\lambda = 1062$  нм) при интервалах мощности 8–20 Вт, частоты импульсов 25–100 кГц и скорости сканирования 100–1000 мм/с. Изучение структуры и свойств материала проводили методами рентгенофазового анализа на установке Дрон-2 с источником излучения Fe ( $\lambda = 1,936$  Å) и рамановской спектроскопии на установке MicroRaman LabRAM HR Visible с длиной волны возбуждения 514,5 нм.

**Результаты.** Экспериментальные исследования позволили установить, что параметры формирования пористого слоя: плотность тока 10 мА/см<sup>2</sup>, время травления 10 мин — обеспечивают пористость 22±3 %.

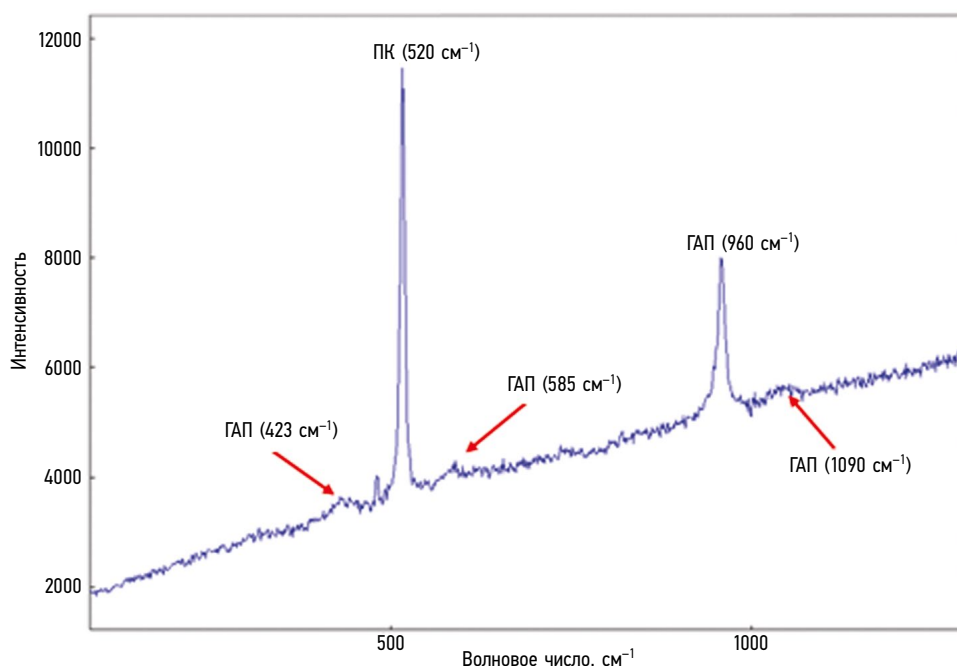


Рис. 1. Рамановская спектроскопия порошка нанокompозита ПК+ГАП

Режимы лазерной обработки существенно влияют на морфологию частиц: скорость сканирования 300–500 мм/с обеспечивает преобладание частиц размером 0,5–2 мкм. Частота импульсов 20–50 кГц предотвращает образование крупных агломератов. Мощность 8–12 Вт оптимальна для сохранения структурной целостности компонентов. В результате лазерной абляции частицы порошка нанокompозита ПК+ГАП оплавляются и принимают округлую форму. Спектроскопические исследования подтвердили сохранение кристаллической структуры гидроксиапатита после всех стадий обработки (рис. 1):

- волновое число  $520 \text{ см}^{-1}$  — кремний;
- $423 \text{ см}^{-1}$  — колебательное валентное колебание соединения  $\text{PO}_4$ ;
- $585 \text{ см}^{-1}$  — деформационное валентное колебание соединения  $\text{PO}_4$ ;
- $960 \text{ см}^{-1}$  — симметричное валентное колебание соединения  $\text{PO}_4$ . Линия симметричного валентного колебания  $(\text{PO}_4)^{3-}$  ( $\nu_1$ ) является самой интенсивной в спектре минерализованной ткани. В высококристаллическом незамещенном ГАП линия  $\nu_1$  сдвигается в область  $962\text{--}964 \text{ см}^{-1}$ ;
- $1090 \text{ см}^{-1}$  — валентное замещение А-типа для соединения  $\text{CO}_3$ , что соответствует биоматериалу из старой костной ткани.

**Выводы.** Разработана воспроизводимая методика получения нанокompозита с контролируемыми характеристиками. Установлены оптимальные параметры синтеза, обеспечивающие высокую степень заполнения пор гидроксиапатитом, преобладание частиц биологически значимого размера (1 мкм), сохранение функциональных свойств компонентов.

**Ключевые слова:** биосовместимые материалы; пористый кремний; гидроксиапатит; лазерная абляция; костная регенерация; нанокompозиты; остеопластика.

## Список литературы

1. Конюхов Ю.В. Разработка научно-технологических основ получения нанопорошков из техногенного сырья и модифицирования материалов с применением энергомеханической обработки: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Москва: Университет МИСИС, 2018. 303 с. EDN: XMOLJB
2. Белорус А.О. Нанокompозиты, полученные внедрением наночастиц и коллоидных квантовых точек в пористые полупроводниковые матрицы: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Санкт-Петербург: ЛЭТИ им. В.И. Ульянова, 2022. 249 с. EDN: ZFJEAQ
3. Ксенофонтова О.И., Васин А.В., Егоров В.В., и др. Пористый кремний и его применение в биологии и медицине // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 1. С. 67–78. EDN: RYJATZ

### Сведения об авторе:

**София Юрьевна Кулагина** — студентка, группа 4201-030402D, физический факультет; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: kulagina4@ya.ru

### Сведения о научном руководителе:

**Сергей Александрович Нефедов** — кандидат физико-математических наук, доцент; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: nef2705@yandex.ru