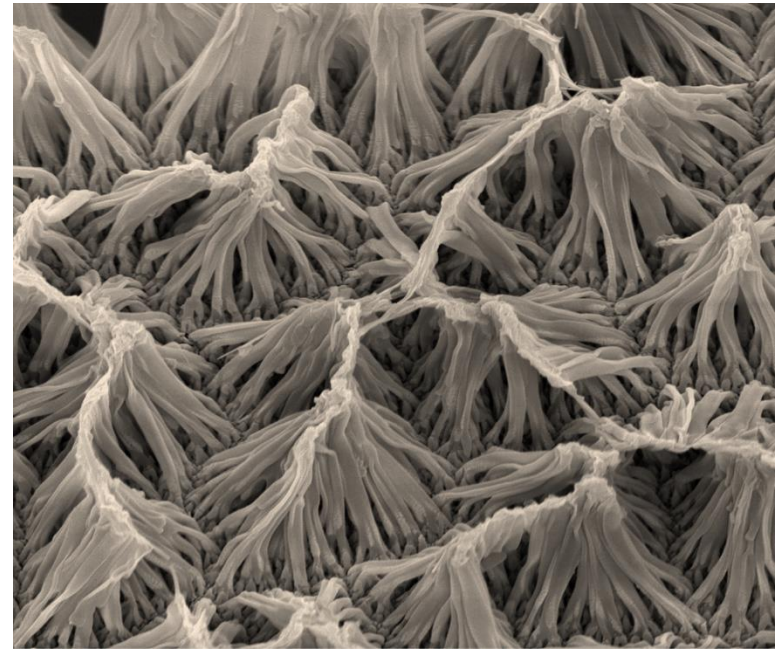


# НАНО ЭЛЕКТРОНИКА



**6.**

## **Функциональная наноэлектроника**

Нанокompозиты, нанокерамики, сверхпроводники

## Основная идея

Микроэлектроника и проистекающие из неё отрасли и научные направления базируются на принципе интеграции дискретных элементов электронной техники, при которой каждый элемент схемы формируется отдельно в полупроводниковом кристалле и реализует свою узкоспециализированную функцию.

Однако прогнозируемый предел повышения степени интеграции предполагает изменение общей концепции обработки информации. **Функциональная электроника** предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать достаточно сложный функционал устройства без применения стандартных базовых элементов, основываясь непосредственно на физических явлениях, характерных для некоторого вещества. В этом случае способ представления результирующей функции устройства в виде электрической схемы из дискретных элементов не требуется.

Данный подход перспективен для разработки устройств, оперирующих большими объёмами информации в реальном времени.

# Композиционные материалы

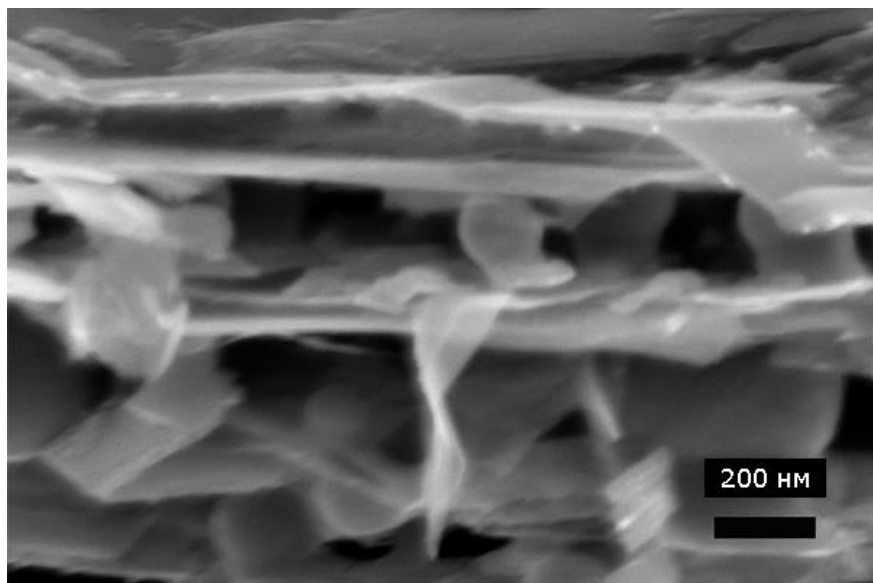
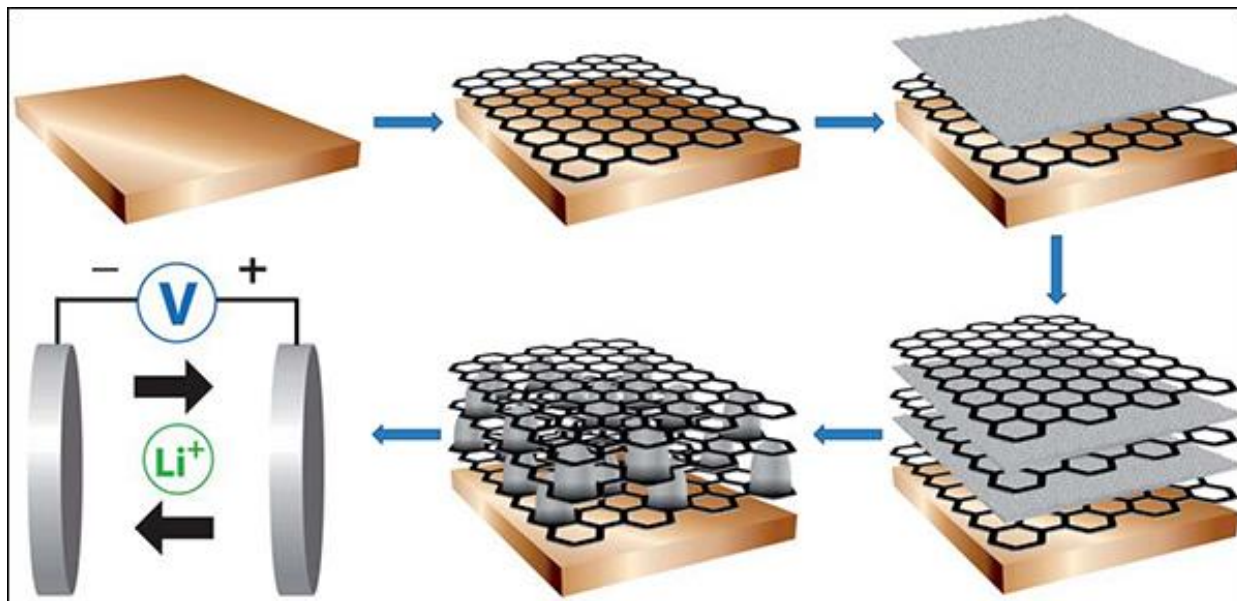
**Композиционные (композитные) материалы** состоят из нескольких, в общем случае, анизотропных компонентов, регулярно или случайно расположенных в пространстве. Свойства компонентов, их пространственное расположение, геометрическая структура, ориентация и размеры кристаллитов и т. п. определяют микроструктуру и соответствующие физико-химические свойства композиционных материалов. Свойства композитного материала количественно и качественно отличаются от свойств каждой из его составляющих.

Обычно многокомпонентные материалы (композиты) состоят из неплотной (пористой, волокнистой, решётчатой и т. п.) основы (**матрицы**), которая заполняется (армируется) одним или несколькими **наполнителями**.

Наполнитель определяет прочность, жёсткость и деформируемость материала, а матрица обеспечивает монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям.



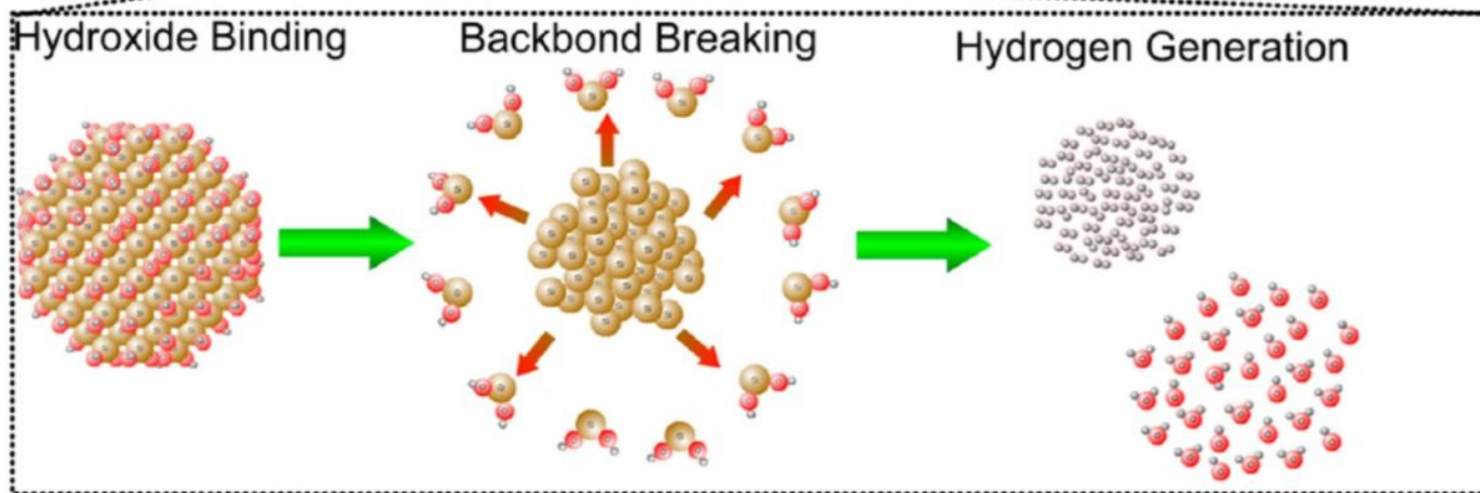
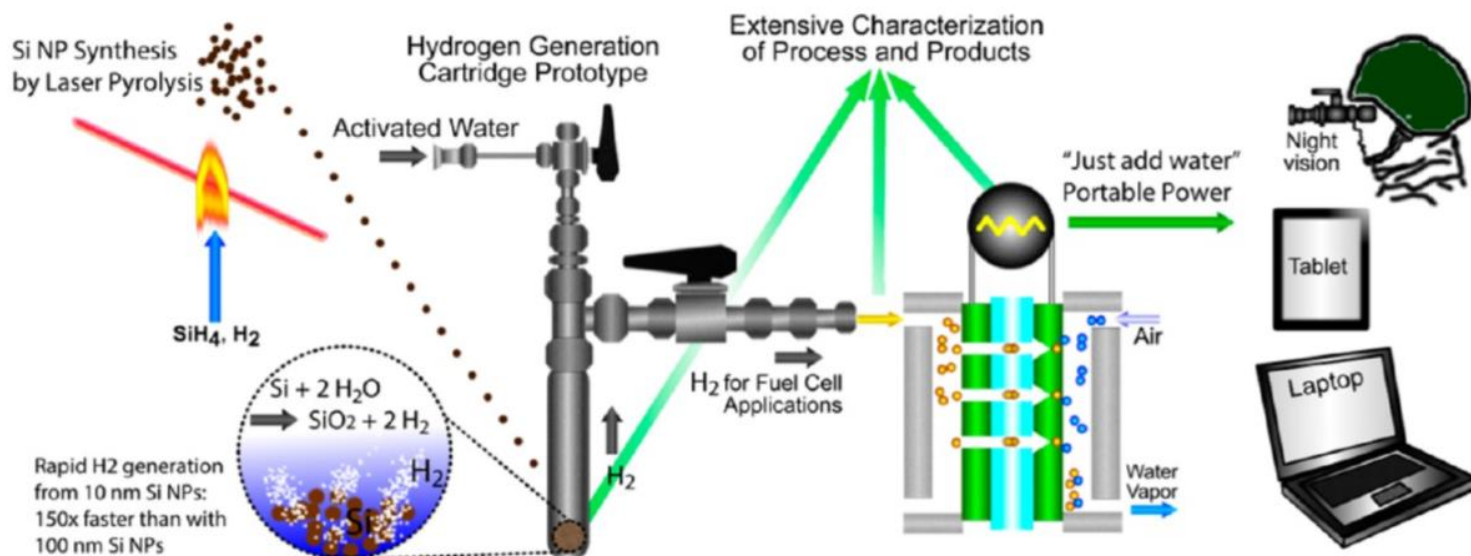
## Перспективы нанокompозитов...



Нанокompозитный анодный материал для литиевых элементов питания (литий-графен-олово + электролит), 2011.

# ... и нанопористых материалов

## Нанокремний как матрица водородного элемента питания



# Классификация композиционных материалов

- ❖ По характеру связности:
  - матричные – матрица как пористый материал со включениями других фаз
  - каркасные – взаимопроникающие пористые материалы
  - поликристаллы, у которых структурные элементы являются одним и тем же веществом, с различной ориентацией осей анизотропии (**керамики**)
- ❖ По форме структурных элементов:
  - волокнистые (одномерные нано- или микроструктуры)
  - **слоистые** (двумерные нано- или микроструктуры), *наиболее важны для электроники*
  - зернистые (обычно – матричные)
- ❖ По расположению структурных элементов:
  - с регулярной структурой
  - со стохастической структурой
- ❖ По ориентации структурных элементов (напр., поликристаллов):
  - кристаллографическая (для анизотропных кристаллов)
  - формы зерна (для геометрически неизометричных зёрен)

# Наноккомпозиты

В широком смысле в наноккомпозиты могут быть включены пористые тела, коллоиды, гели и сополимеры, но чаще наноккомпозитами именуют гетерогенное твёрдое тело, состоящее из объёмной матрицы и наноразмерной дисперсной фазы, которая отличается от объёмной фазы по своим свойствам.

В композиционных материалах можно совмещать прочность на разрыв и сжатие, принадлежащие матрице и армирующей добавке, соответственно. В частности, наноккомпозиты с улучшенными механическими свойствами можно создавать путём армирования полимерных, металлических или керамических материалов. Так, наноккомпозиты, в которых в качестве матрицы выступают металлы, а в качестве наноносителя – ультрадисперсные алмазоподобные структуры или фуллерены, показывают лучшее сопротивление износу, чем используемые в настоящее время износостойкие сорта стали. Введение углеродных нанотрубок в металлическую матрицу позволяет уменьшить силу трения, что приводит к улучшению трибологических свойств (для никеля износ уменьшается в 4 раза) .

# Наноккомпозиты

Сравнение физико- и термо-механических свойств эпоксинаноккомпозитов					
	Температура стеклования, °С	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Полная относительная деформация при растяжении $\delta$ , %	Источник
Исходная композиция	170.15	2.0	72.6	5.4	[21]
Модификация 0.5 % УНТ	164.64	2.3	71.5	4.6	
Модификация 0.5 % АУНТ*	158.86	2.5	88.5	7.5	
Исходная композиция	—	3.29	63.8	7.35	[36]
Модификация 0.1 % УНТ	—	3.35	62.5	7.25	
Модификация 0.1 % АУНТ*	—	3.5	6.9	7.7	

\*Углеродные нанотрубки, функционализированные аминогруппами.



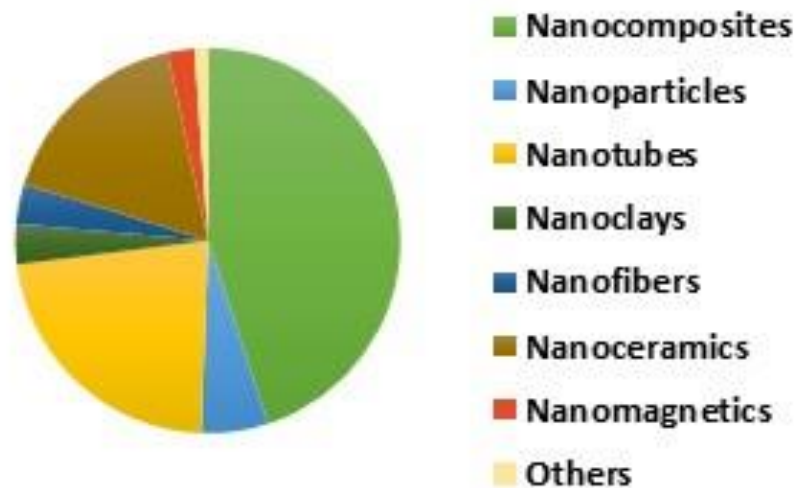
## Мировой рынок нанокompозитов

Мировой рынок нанокompозитов представлен тремя основными сегментами:

- нанокompозиты с керамической матрицей
- нанокompозиты с металлическими матрицами
- нанокompозиты с полимерными матрицами

Чаще всего в качестве матрицы выступают полимеры. Металлы и керамика используются значительно реже.

Nanotechnology Market Revenue, By Type (%)

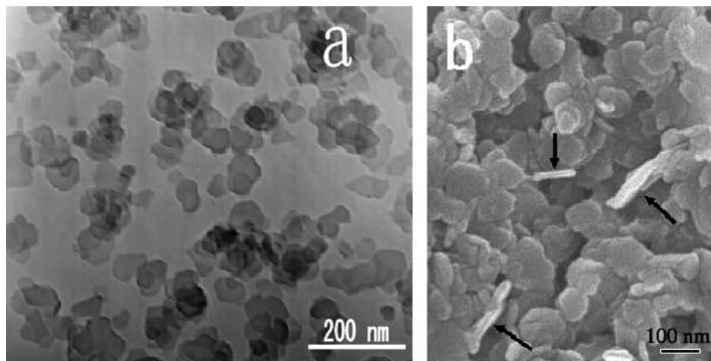


Source : IndustryARC Analysis, Expert Insights

The global nanotechnology market size was between \$45 billion to \$50 billion as of 2018

## Способы получения полимерных нанокомпозитов

- смешение нанонаполнителя и порошкообразного полимера с последующим прессованием;
- введение наполнителя в расплавленный полимер (экструзионный метод);
- смешение дисперсии частиц наполнителя с раствором полимера с дальнейшим выпариванием растворителя;
- полимеризация *in situ* (наполнитель диспергируется в мономере, а затем протекает полимеризация, совместно с захваченными наночастицами);
- темплатный (матричный) синтез;
- золь-гель процесс;
- коагулирование раствора полимера с введенным в него наполнителем путём изменения химического состава;
- электрохимический метод



полимеры на основе модифицированных слоистых силикатов (наноглины)

# Керамики

Исторически под керамикой понимали изделия и материалы, получаемые спеканием глин и их смесей с минеральными добавками. Со времени, когда было освоено производство промышленных изделий из керамики на основе карбида кремния, изменилось и понимание этого термина.



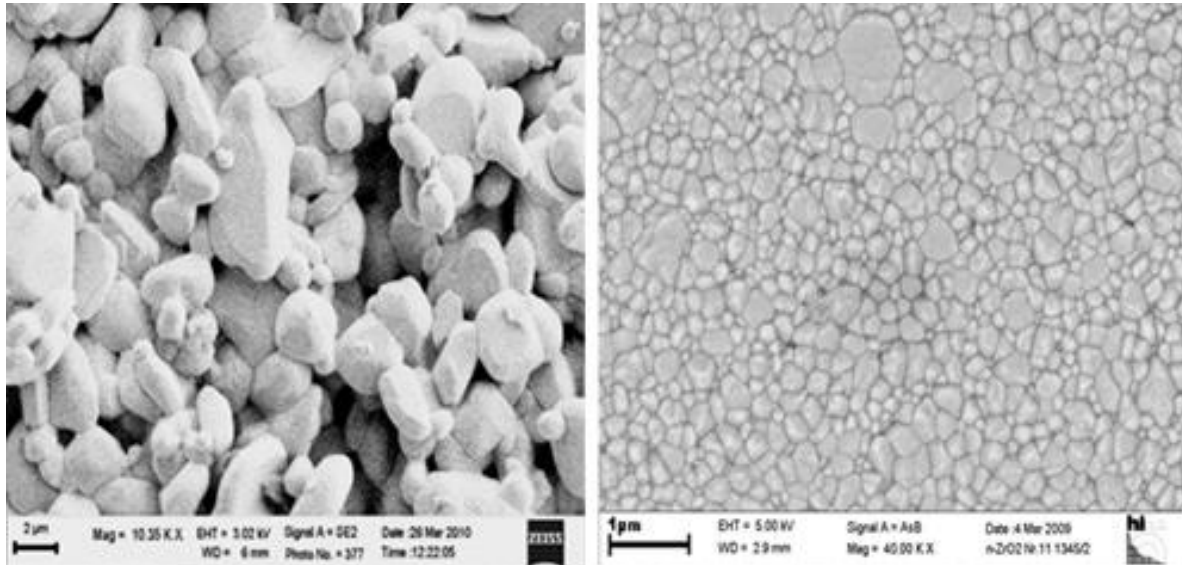
Сегодня под термином **«керамика»** понимают любые поликристаллические материалы, получаемые спеканием неметаллических порошков природного или искусственного происхождения. Функциональной называют керамику со специфическими электрическими, магнитными, оптическими и термическими функциями. Важнейшими компонентами современной керамики являются оксиды алюминия, циркония, кремния, бериллия, титана, магния, нитриды кремния, бора, алюминия, карбиды кремния и бора, их твёрдые растворы и различные композиты на их основе.

## Применение керамик в электронике

1. В качестве изоляторов, в силу обычно высоких значений диэлектрической проницаемости и электрической прочностью (керамические конденсаторы). В качестве проводников используются лишь редкие виды керамик (на основе  $PbO$ ,  $RuO_2$ ,  $Bi_2Ru_2O_7$ ).
2. Как полупроводниковый материал для создания терморезисторов и варисторов (термодатчики, устройства защиты от импульсных перенапряжений).
3. Пьезокерамики как электромеханические и электроакустические преобразователи ( $PbZrO_3 - PbTiO_3$ ). Гидроакустическое применение получила композитная керамика, в которой пьезокерамика служит наполнителем полимерной матрицы.
4. Как подложки и корпуса для интегральных схем. Обычно это тонкие пластины  $\alpha-Al_2O_3$ , с высоким сопротивлением и высокой теплопроводностью.
5. Как материалы с магнитными функциями. Это, в первую очередь, ферриты, отличающиеся высоким электрическим сопротивлением ( $A_xB_yFe_nO_m$ ).
6. Материалы с оптическими функциями (оптически прозрачная керамика, керамика с люминесцентными и электрохромными свойствами, светочувствительная керамика). Пример – оксид иттрия с ионами редкоземельных элементов.
7. Материалы с химическими функциями (хемосорбция – газовые детекторы, избирательные мембраны).

# Нанокерамики

Любой керамический материал является композитной структурой, состоящей из кристаллической, стекловидной и газовой фаз (поры). Кристаллическая фаза, являясь основой керамики, представляет собой различные химические соединения или твёрдые растворы и определяет её основные физико-химические свойства. Стекловидная фаза находится в керамике в виде прослоек стекла, связывающих кристаллическую фазу.

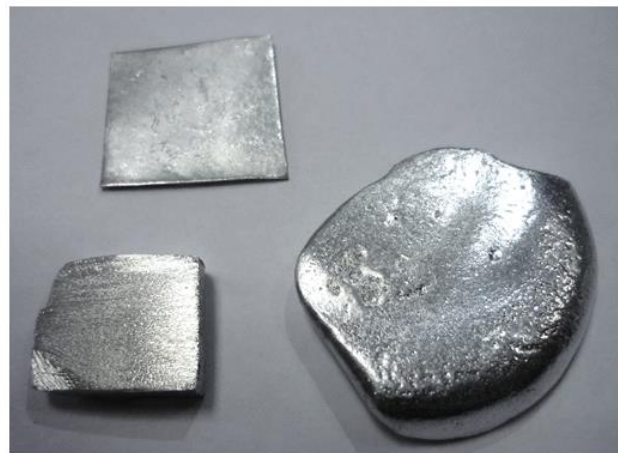


Исходные керамические материалы непрозрачны из-за особенностей их структуры. Однако спекание частиц нанометровых размеров позволило создать прозрачные керамические материалы, обладающие специфическими оптическими свойствами (диапазоном рабочих длин волн излучения, дисперсией, показателем преломления).

## Композиты на основе нанокерамик

Нанокристаллический материал может быть разделён на две структурные компоненты: **кристаллическую**, которая включает в себя атомы, расположенные внутри кристаллитов, и **межкристаллитную**, образуемую из всех атомов, расположенных на границах кристаллитов. Хаотичное расположение межкристаллитных атомов – характерная черта нанокристаллических материалов. Объёмные доли межкристаллитной и кристаллической компонент можно считать равными при размере зерна около 5 нм и при толщине границы 1 нм.

Таким образом, нанокристаллические материалы представляют собой изотропную матрицу, в которую случайным образом вкраплены включения кристаллической фазы.



Композиты на основе металлической матрицы с добавками наночастиц различной природы сочетают в себе свойства металлов, такие, например, как пластичность и прочность со свойствами, присущими керамике: низким коэффициентом термического расширения, термостойкостью и химической инертностью. Примеры – бороалюминий, углеалюминий.

## Высокотемпературные сверхпроводники

Высокотемпературные сверхпроводники представляют особый интерес для электроники, так как делают возможным создание дешёвых электронных приборов на основе эффектов Джозефсона и Мейснера. При этом наилучшие характеристики достигаются при размерах активной зоны менее 10 нм, что связано с малой длиной корреляции носителей (0.1-1.5 нм).



## Сверхпроводники на наноструктурах

Для формирования ВТСП плёнок толщиной до 100 нм используются методы лазерной абляции, MOCVD, магнетронного распыления и аэрозольного осаждения. Пример – плёнки  $Y_1B_2C_3O_7$ ,  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$  (93 К).

Если объёмный сверхпроводник на основе железа – простейший сверхпроводник ферроселен, который имеет критическую температуру 17 К – нанести в виде монослоя на  $LaSrTiO_3$  или на подложку  $SrTiO_3$ , то в нём получится критическая температура 70 К !

В перспективе создание КТСП (сверхпроводимость при комнатной температуре) может быть решено в первую очередь путём получения искусственных многослойных структур (или керамик ?) с определённым электронным спектром и сильным электрон-фононным взаимодействием.



aspire invent achieve

