Технология синтеза КТ CdSe

1) Химическая реакция, 2) Нуклеация;
3) Рост зародышей; Фокусировка по размерам;
4) Стадия созревания Освальда;

Синтез коллоидных КТ в неполярных средах.

Для синтеза коллоидных квантовых точек используются химические методы, основанные на росте нанокристаллов. Квантовые точки наилучшего качества получены методом *роста в неполярных средах* – методом, предложенным C.B. Murray в 1993г.

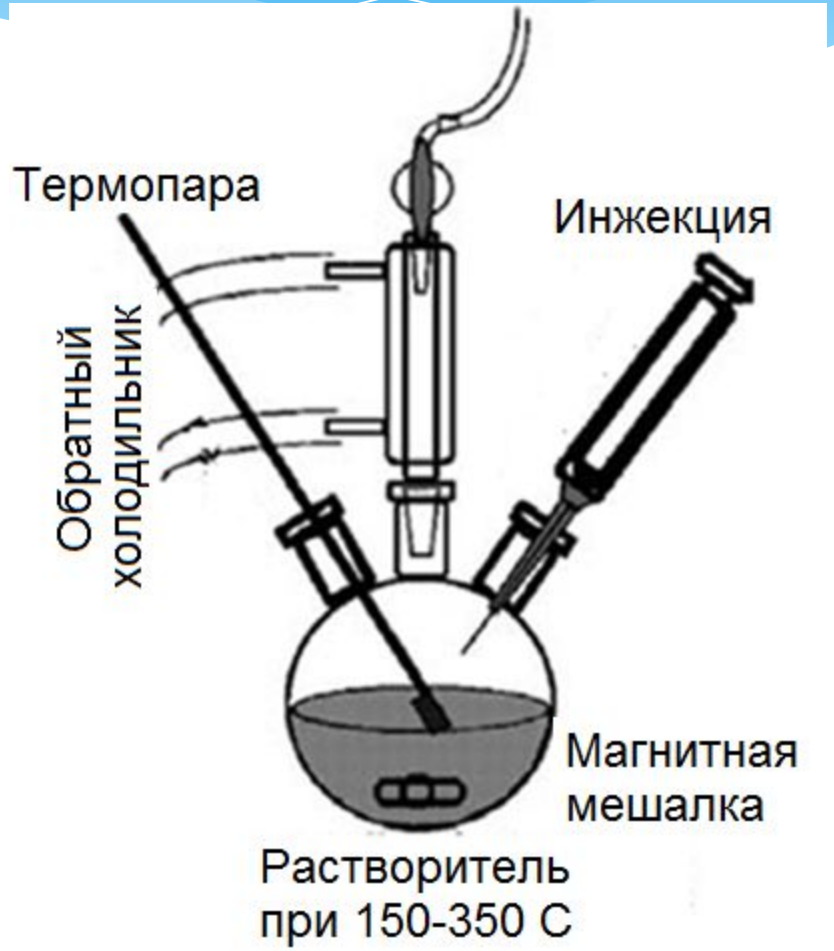
Метод роста коллоидных квантовых точек в неполярных средах обладает рядом несомненных преимуществ, обеспечивая:

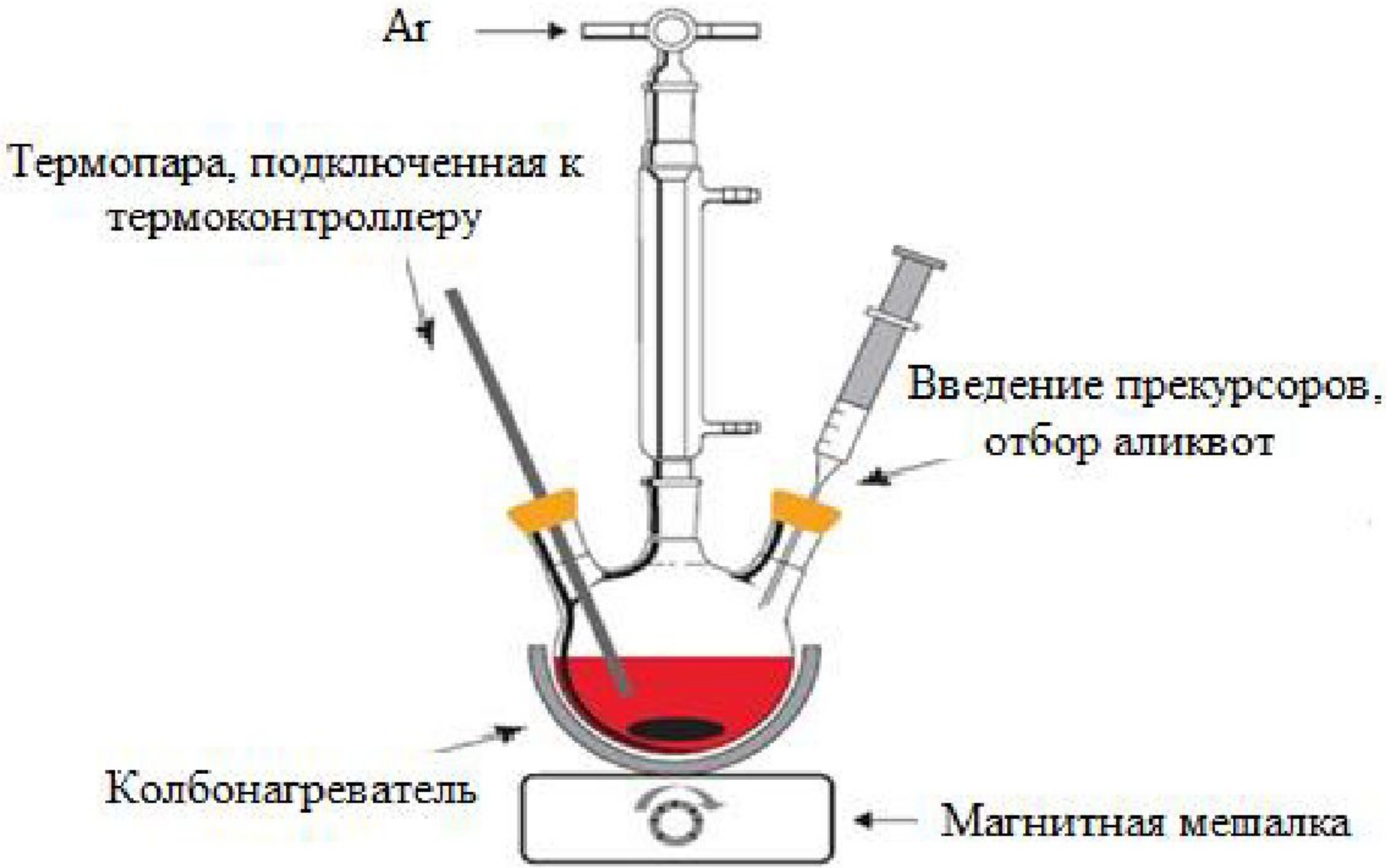
1. возможность контроля процесса роста квантовых точек;
2. хорошую пассивацию поверхностных состояний квантовых точек ;
3. узкое распределение по размерам (на уровне 5-8 %).

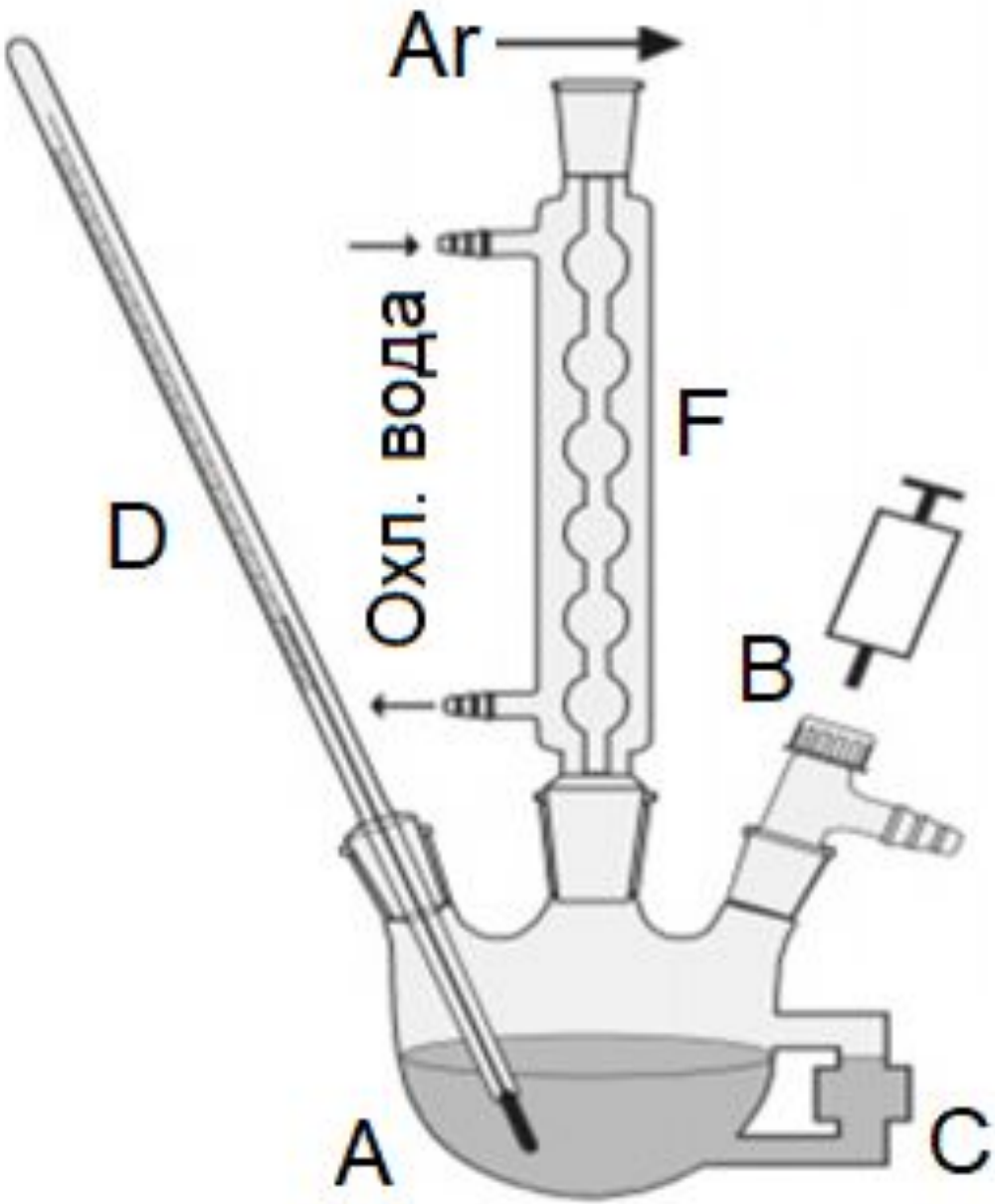
В коллоидном синтезе можно выделить 4 основные стадии:

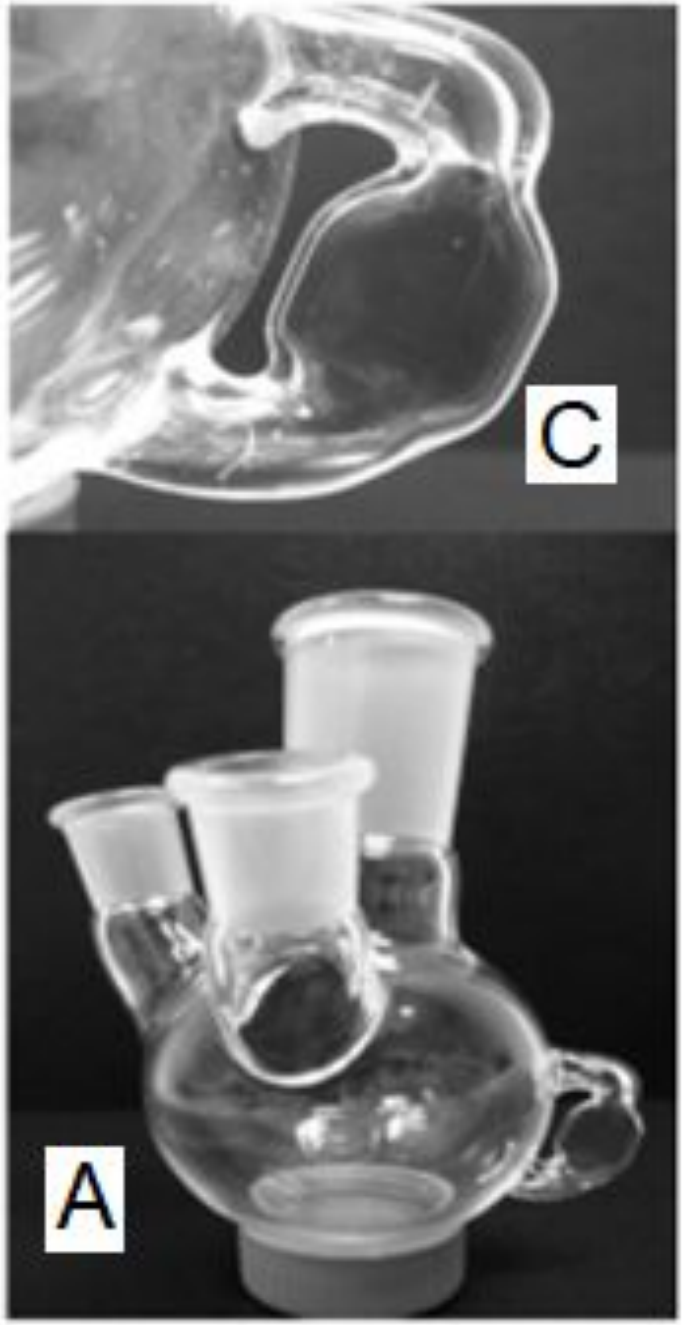
1) Химическая реакция, в которой создаются целевые мономеры;
2) Нуклеация;
3) Рост зародышей; Фокусировка по размерам;
4) Стадия созревания Освальда;

Синтез проводится в трехгорлой колбе, поддержание температуры химической среды осуществляется при помощи колбонагревателя и системы термостатирования, считывающей значения с погруженной в раствор термопары. Однородность нагрева и распределения компонентов в дисперсионной среде достигается перемешиванием при помощи магнитной мешалки.



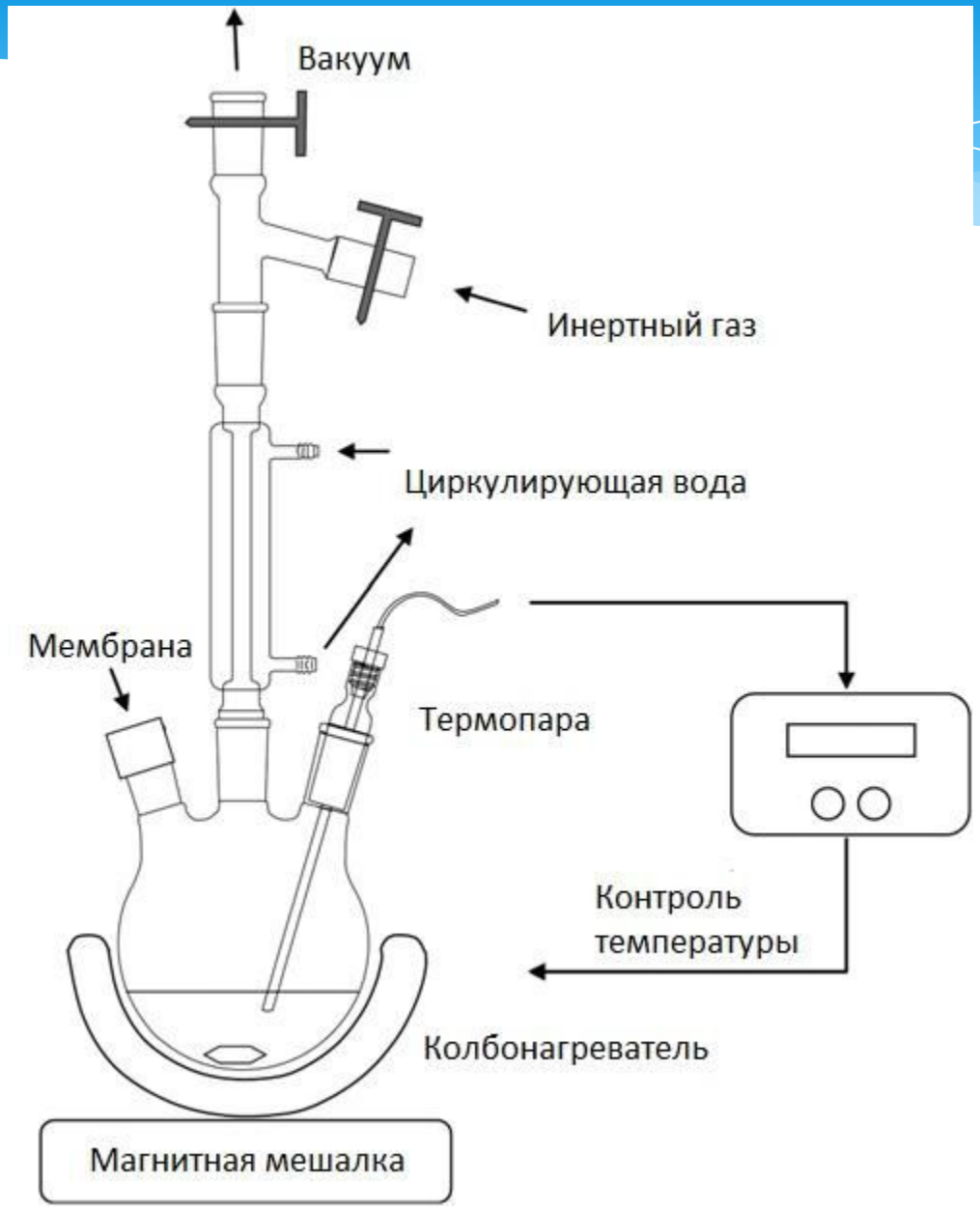

Ar
Термопара, подключенная к термоконтроллеру
Введение прекурсоров, отбор аликвот
Колбонагреватель
Магнитная мешалка


Ar
Охл. вода
F
D
B
A
C


C
A

Обратный холодильник

Холодильники бывают с воздушным охлаждением, бывают с водяным... Воздушный обратный холодильник применяется для высококипящих веществ, чтобы разница температуры охлаждающего воздуха и паров кипящих была не более 100 градусов, иначе стекло просто лопнет... Если мы кипятим легколетучее вещество, то его пары надо охлаждать водой, соответственно в рубашку холодильника (трубка в трубке) подается вода, подается по принципу противотока... т.е. сверху вниз.... скорость подачи - напор, определяется интенсивностью кипения в колбе....


Вакуум
Инертный газ
Циркулирующая вода
Мембрана
Термопара
Контроль
температуры
Колбонагреватель
Магнитная мешалка

1. Химическая реакция

В непрерывно перемешиваемую и нагретую до температуры нуклеации (Tn = 200 – 300 °C) дисперсионную среду, содержащую один из прекурсоров – источник ионов A, входящих в полупроводниковое соединение AB, впрыскивается состав, содержащий источник B.

Например, в случае наночастиц селенида кадмия CdSe, в раствор прекурсора кадмия может впрыскиваться раствор прекурсора селена или наоборот. Прекурсоры образуют химически активные атомные или молекулярные фрагменты – *мономеры*:

$$nA + nB = n(AB).$$

Так, в пионерской работе группы Бавенди синтез проводился следующим образом (на примере селенида кадмия): Нуклеация проводилась в растворе фос-форорганического вещества три-н-октилфосфиноксида (сокращенно TOPO). Сначала нужно готовились растворы компонентов в растворителе, похожем на TOPO (чтобы обеспечить хорошую растворимость всех компонентов системы в TOPO). Для этого были взяты органометал-лическое соединение кадмия диметилкадмий (DMCd) и три-н-октилфосфид селена (TOPSe). Каждый из компонентов был растворен в небольшой порции три-н-октилфосфина (TOP).

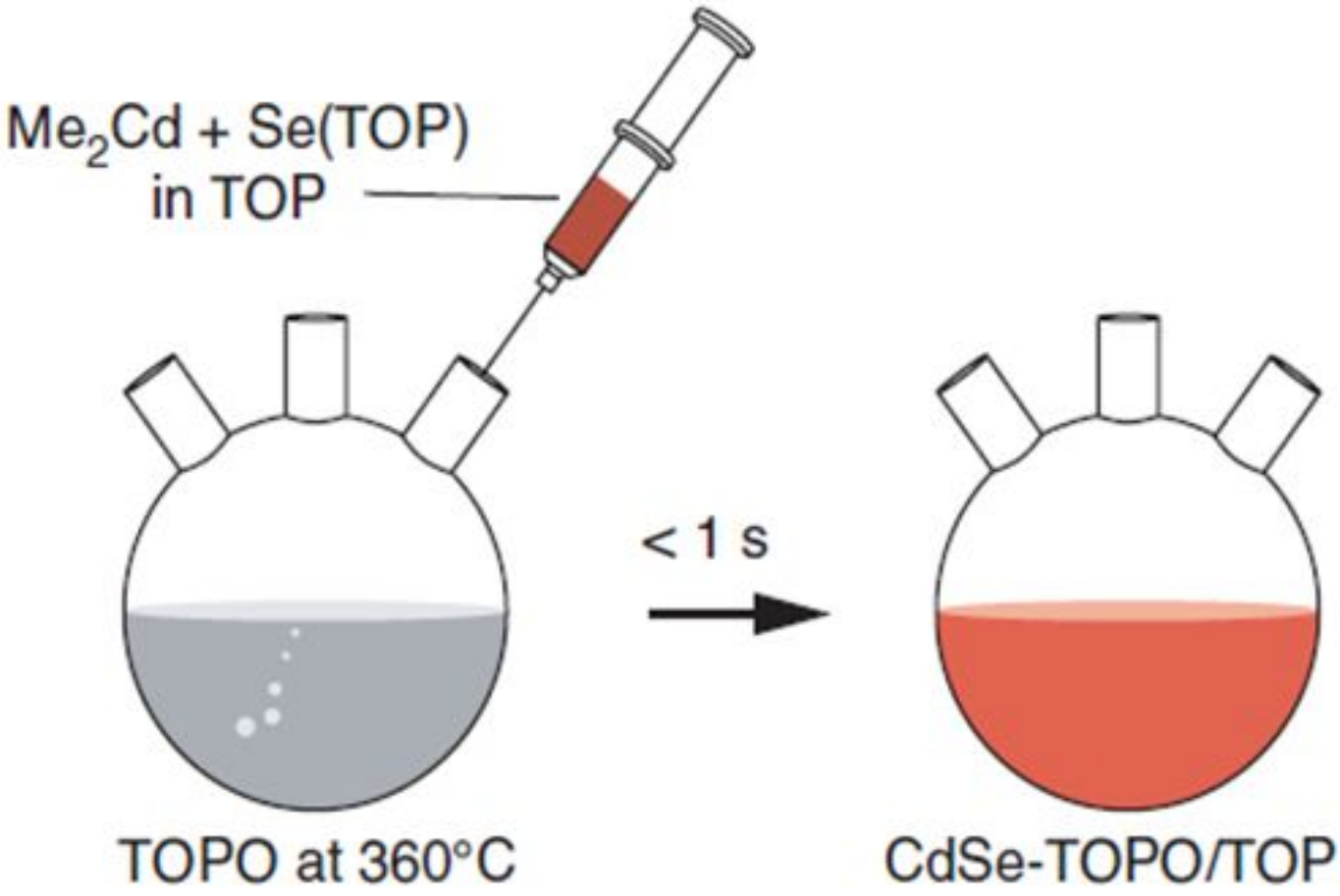
C.B.Murray, D.J.Norris, and M.G.Bawendi, J. Am. Chem. Soc., 115, 8706 (1993).

Для справок:

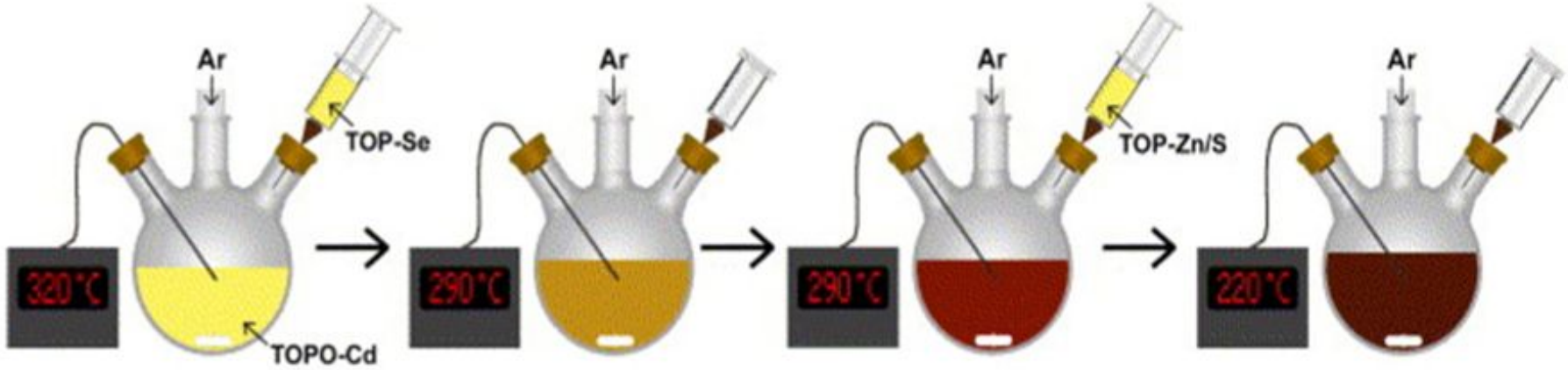
1. Триоктилфосфин (TOP) $P(C_8H_{17})_3$ – стабилизатор частиц в неполярной среде, координирующий агент халькогенов (TOP-S, TOP-Se, TOP-Te).
2. Триоктилфосфин оксид (TOPO) $OP(C_8H_{17})_3$ – стабилизатор в неполярной среде.
3. Олеиновая кислота (OA) $CH_{37}CH=CH_7COOH$.
4. Олеиламин $C_{18}H_{35}NH_2$ - стабилизатор в неполярной среде, растворим в октадецене.
5. Диметилкадмия (Me_2Cd) – прекурсор Cd,
6. Три-н-октилфосфид селена (TOPSe) - прекурсор Se.

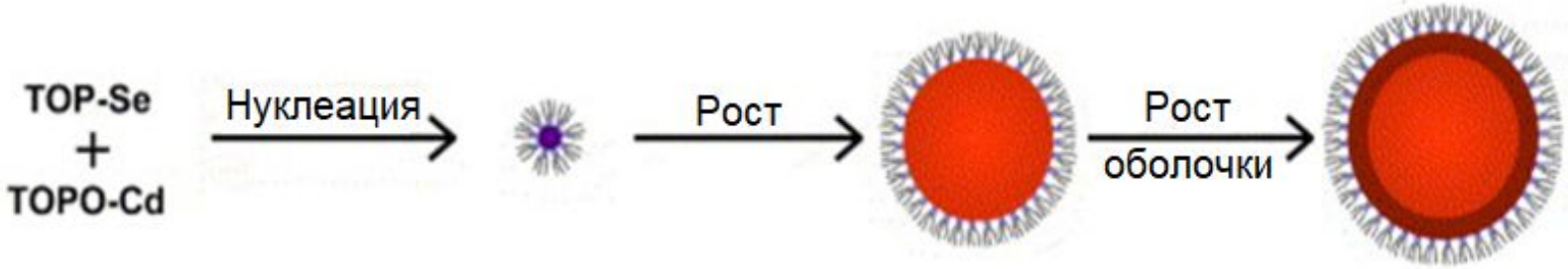
После этого растворы обоих компонентов смешивали в шприце и быстро впрыскивали в колбу с TOPO, которая была нагрета до 200-260°C. Вся идея синтеза заключалась в том, что все органические части системы (TOP, TOPO, DMCd и TOPSe) хорошо растворимы друг в друге. Поэтому молекулы DMCd легко контактируют с молекулами TOPSe и между ними происходит химическая реакция, которую упрощенно можно записать следующим образом:

$$DMCd + TOPSe \rightarrow CdSe + TOP, TOPM$$


Me_2Cd + Se(TOP)
in TOP
< 1 s
TOPO at 360°C
CdSe-TOPO/TOP

Метод основан на том, что образующийся ***селенид кадмия, в отличие от всех остальных компонентов системы, практически не растворим в ТОРО или в ТОР.*** Поэтому его концентрация становится очень высокой практически сразу. В результате селенид кадмия начинает выпадать в отдельную фазу по механизму гомогенной нуклеации. Этот процесс легко видеть по изменению цвета системы. По оттенку желтого или красного цвета можно довольно точно определить размер образовавшихся наночастиц (обычно от 1,5 до 15 нанометров) и остановить процесс по достижению желаемого размера.


Ar
TOP-Se
320°C
TOPO-Cd
Ar
290°C
Ar
TOP-Zn/S
290°C
Ar
220°C

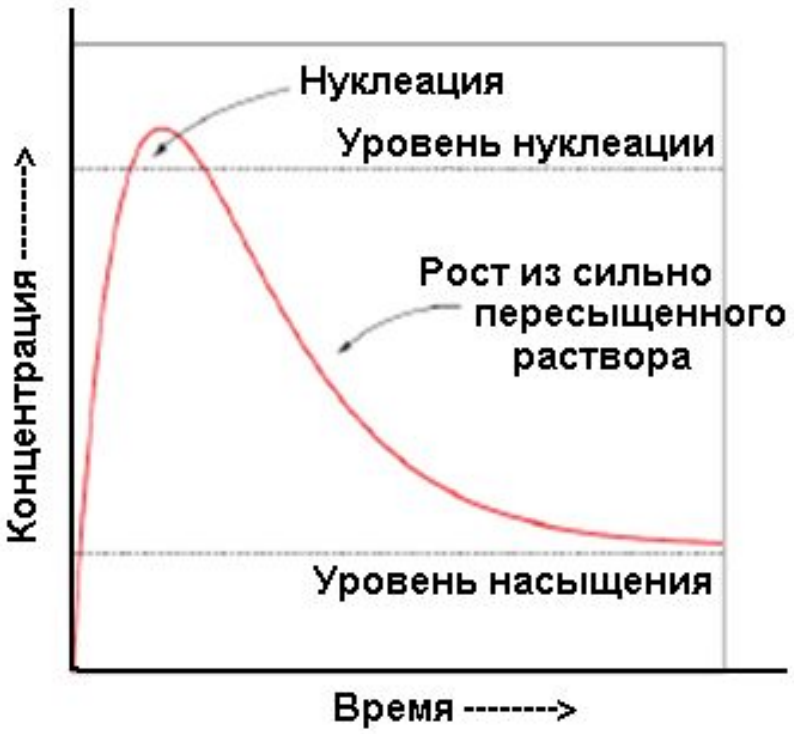

TOP-Se
+
TOPO-Cd
Нуклеация
Рост
Рост
оболочки

Помимо прочего ТОРО является еще и хорошим стабилизатором наночастиц. Он обволакивает каждую частицу и препятствует их слипанию.
Синтез Бавенди является сегодня классическим способом получения наночастиц полупроводников.

(Bawendi M.G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites. J. Am. Chem. Soc. 1993, 115: 8706-8715).

2. Стадия нуклеации в пересыщенном растворе.

Вследствие быстро протекающей реакции наблюдается локальное пересыщение раствора, в результате происходит нуклеация – образование зародышей твердой фазы



Согласно классической теории зародышеобразования нуклеация происходит спонтанно: в некоторых нестабильных участках пересыщенного раствора молекулы или ионы растворённого вещества сами по себе способны кристаллизоваться, образуя *зародыши.* Временные рамки очень коротки: от нескольких *миллисекунд до нескольких секунд.*

Расчёт работы образования зародыша новой фазы

- Пусть формируется "сферическое" ядро кристаллической фазы из жидкой фазы. Мы будем обозначать:

$\Delta G_C(R,T)$: разность свободной энергии кристаллического ядра радиуса R и эквивалентного объёма жидкости при т-ре T;

$\Delta G_C^0(T)$: разность объёмной части свободных энергий кристалла и жидкости (в объёме зародыша) при температуре T;

σ : межфазная удельная поверхностная энергия.

$$\Delta G_C(R,T) = \frac{4}{3}\pi R^3 \Delta G_C^0(T) + 4\pi R^2 \sigma$$

Должна быть <0 для процесса кристалли-зации.

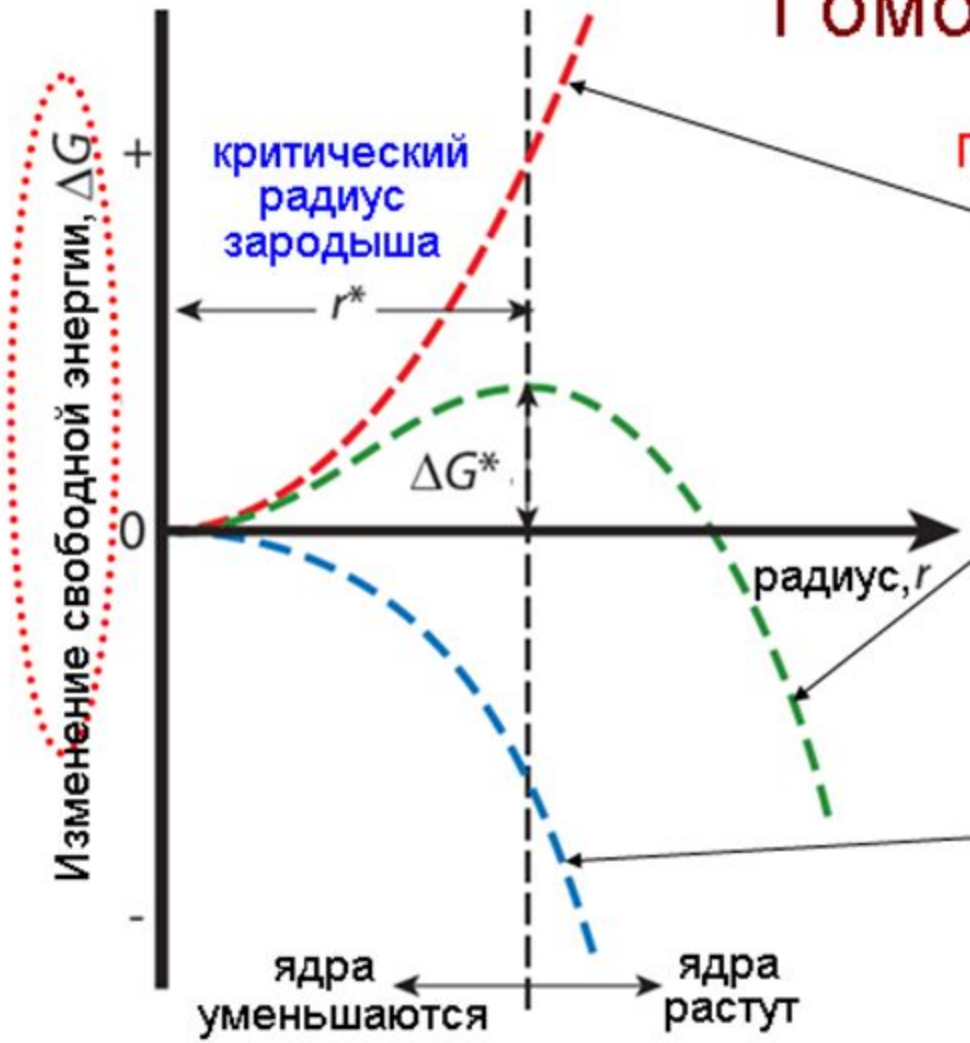
< 0 если $T < T_M$

$= 0$ если $T = T_M$

> 0 если $T > T_M$

Всегда >0 как энергия поверхности.

Гомогенная нуклеация



Поверхностная свободная энергия

$$\Delta G_S = 4\pi r^2 \sigma$$

σ = удельная поверхностная энергия.

$$\Delta G_T = \Delta G_S + \Delta G_V$$

Общая свободная энергия.

Объёмная свободная энергия.

$$\Delta G_V = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_\upsilon$$

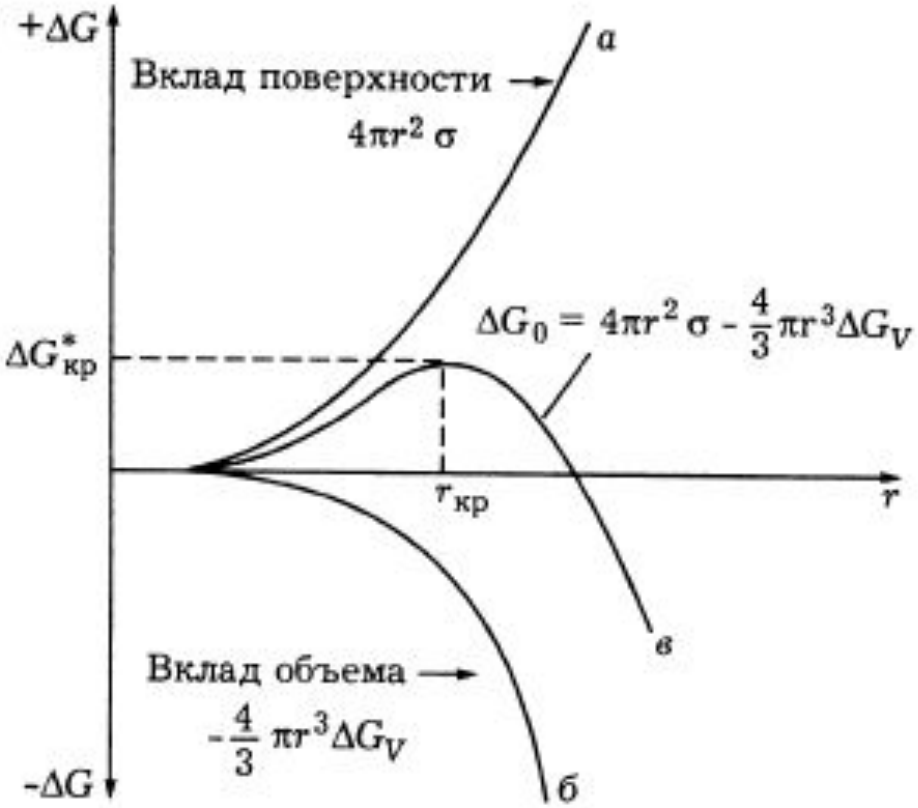
$$\Delta G_\upsilon = \frac{\Delta G_V}{V}$$

Схема формирования барьера нуклеации:

а) увеличение свободной энергии из-за роста межфазной поверхности,

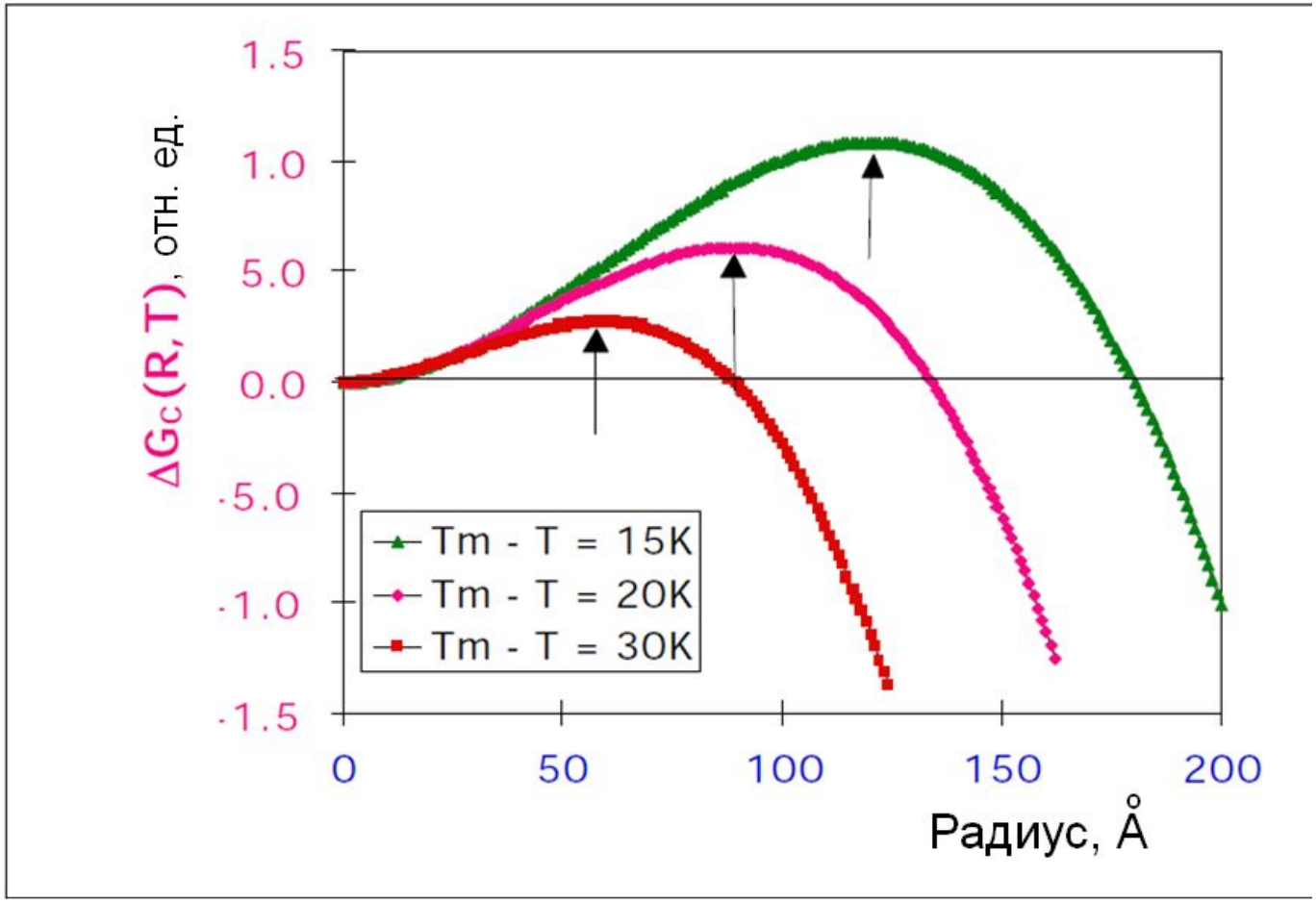
б) снижение свободной энергии из-за фазового превращения,

в) результирующее изменение ΔG.



$$r_c = \frac{2\sigma v_2}{\mu_1 - \mu_2} = \frac{2\sigma v_2}{\Delta\mu}$$

$$\Delta G_c = \frac{16\pi}{3}\frac{\sigma^3 v_2^2}{|\Delta\mu|^2}$$



Кристаллизация из раствора:

Применительно к процессу выделения твердой или жидкой фазы из раствора формулы принимают вид:

$$r_c = \frac{2\sigma v_2}{\mu_1 - \mu_2} = \frac{2\sigma v_2}{\Delta\mu} \qquad \Delta\mu = -kT\ln\frac{C_1}{C_0}$$

$$\Delta G_c = \frac{16\pi}{3}\frac{\sigma^3 v_2^2}{\left(kT\ln(C_1/C_0)\right)^2} \qquad C(r) = C_0\exp\frac{2\sigma v_2}{rkT}$$

где C_0 - концентрация насыщенного раствора, C_1 - концентрация пересыщенного раствора,
V_2 - объём на молекулу в новой фазе.
Отношение C_1/C_0 называют *пересыщением.*

3. Рост частиц в растворе

Наночастицы с равномерным распределением по размерам, могут быть синтезированы, если все ядра формируется в одно и то же время. В этой процедуре, все ядра, вероятно, первоначально имеют аналогичные размеры. Если их последующий рост аналогичен, будут получены монодисперсные частицы. Поэтому весьма желательно, чтобы зарождение происходило в очень короткий период времени.

Чтобы добиться резкой нуклеации, концентрация растворенного вещества должна увеличиваться резко до очень высокого пересыщения, а затем быстро опускаться ниже минимальной концентрации, необходимой для начала нуклеации. Новые ядра более не образуются ниже этой концентрации, в то время как существующие ядра продолжают расти, пока рост частиц не снизит концентрацию до равновесного значения.

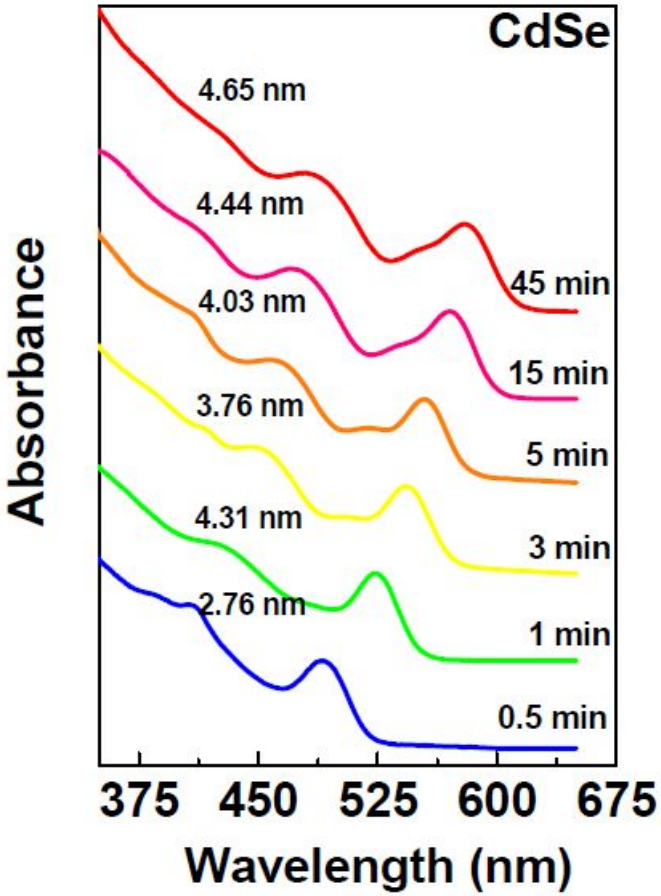
Рост ядер зависит от нескольких шагов, таких как,

(I) нуклеация зародышей,

(II) диффузия мономеров из раствора к растущей поверхности,

(III) адсорбция мономеров на поверхности роста и

(IV) роста поверхности путем необратимого включения мономеров (или кластеров) в поверхность растущей частицы.



Спектры поглощения NP CdSe при комнатной температуре, диспергированных в хлороформе, при размерах в диапазоне от ~ 2,76 до 4,65 нм в зависимости от времени роста при температуре около 280 °C. Все образцы были приготовлены идентично, но изменялось время реакции.

Рассмотрим рост сферического ядра. Если процесс роста контролируется диффузией мономеров из объема раствора к поверхности частиц, скорость роста определяется зависимостью:

$$dr/dt = D(C_b - C_S)v_n/r, \qquad (1)$$

где r - радиус ядра, t - время, D - коэффициент диффузии мономеров C_b - объемная концентрация, C_S - концентрация на поверхности твердых частиц и v_n - молярный объем ядер.

Если начальный радиус ядра r_0, и если концентрация в объеме не существенно меняется со временем, мы можем проинтегрировать уравнение (1) и получим следующее уравнение:

$$r^2 = r_0^{\ 2} + 2D(C_b - C_S)\, v_n\, t = r_0^2 + k_d\, t.$$

Можно показать, что для двух частиц с различным начальным радиусом, разница в радиусах уменьшается с течением времени, и частицы растут в размерах. Следовательно, однородные по размеру частицы образуются за счет диффузионного роста.

Если процесс диффузии является быстрым, $C_S \approx C_b$, а скорость роста контролируется процессами на самой поверхности. Существуют два механизма для включения мономера в поверхность: мононуклеарный рост и рост полиядерный.

В росте моноядерном рост протекает послойно. Мономеры при росте по мере включения заполняют один слой и переходят к другому слою после того, как рост предыдущего слоя закончится.

Скорость роста при мононуклеарном механизме роста пропорциональна площади поверхности, т.е.

$$dr/dt = k_m r^2 , \qquad (2)$$

где k_m - константа пропорциональности. Изменение радиуса со временем дается ф-лой:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_0} - k_m t$$

Можно показать, что различие в радиусах между двумя частицами в этом механизме возрастает с увеличением времени. Таким образом, этот механизм роста не способствует синтезу наночастиц сходного размера.

При полиядерном росте, второй слой начинает расти даже до того, как рост первого слоя завершен. Это, как правило, наблюдается, когда поверхностная концентрация высока. В многоядерном механизме роста, скорость роста частицы не зависит от размера частиц или времени, т.е.

$$dr/dt=k_{p.} \qquad 4)$$

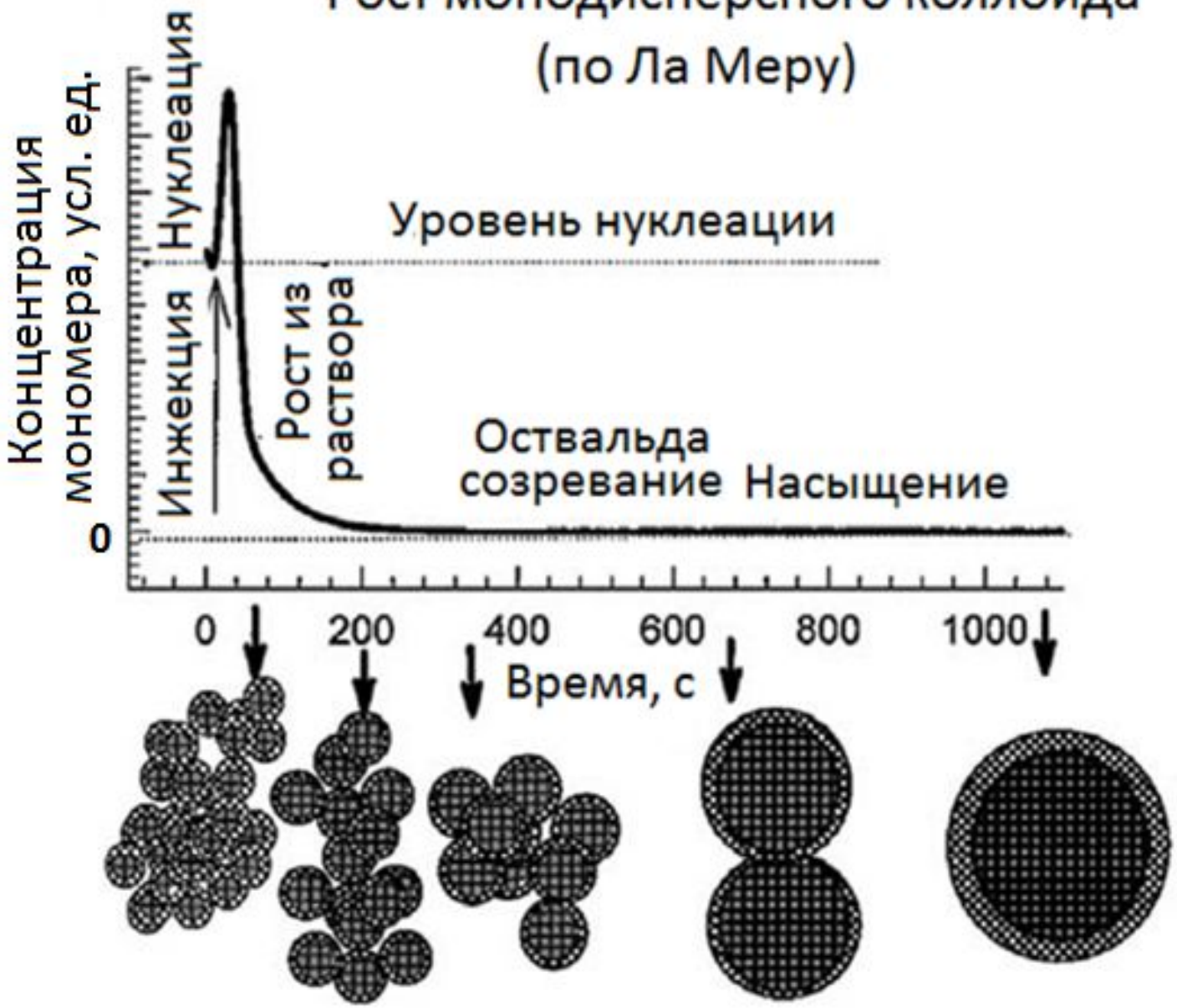
Радиус частиц линейно изменяется со временем.

$$r = r_0+k_p t. \qquad (5)$$

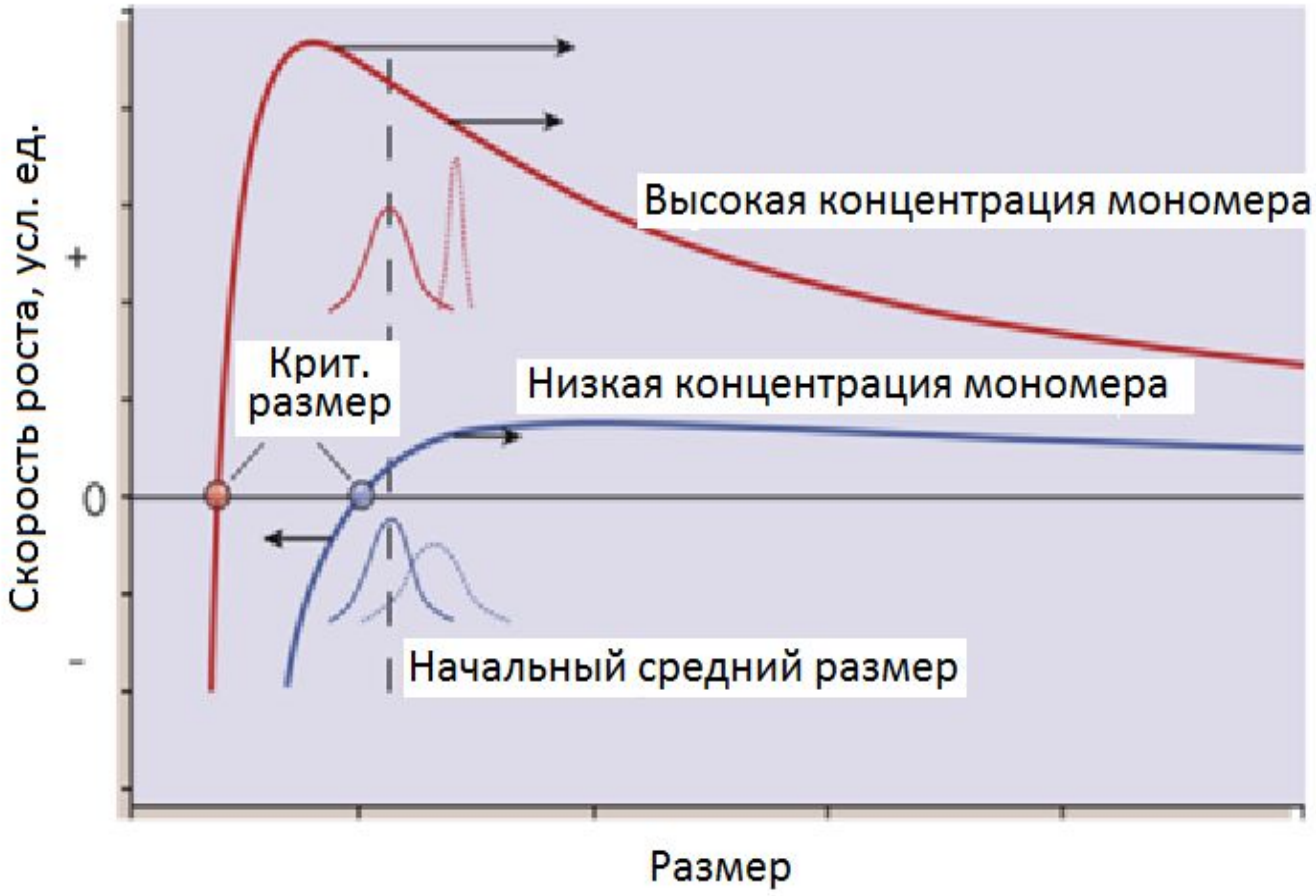
Таким образом, в этом механизме, разница в радиусах между двумя частицами остается постоянной, независимо от времени их роста.

Среди трех механизмов, описанных здесь (т.е. диффузионноконтролируемый рост, мононуклеарное включение мономеров в поверхность и многоядерное включение в поверхность), очевидно, что только контролируемый диффузией рост был бы на пользу получения наночастиц одинакового размера. Однако, вполне вероятно, что рост наночастиц включает в себя все три механизма. Когда ядра малы, может доминировать механизм роста мононуклеарный. По мере того как ядра становятся все больше, полиядерный механизм может доминировать, и при относительно более крупных частицах, рост контролируется диффузией.

Рост монодисперсного коллоида (по Ла Меру)



Стадия роста зародышей.



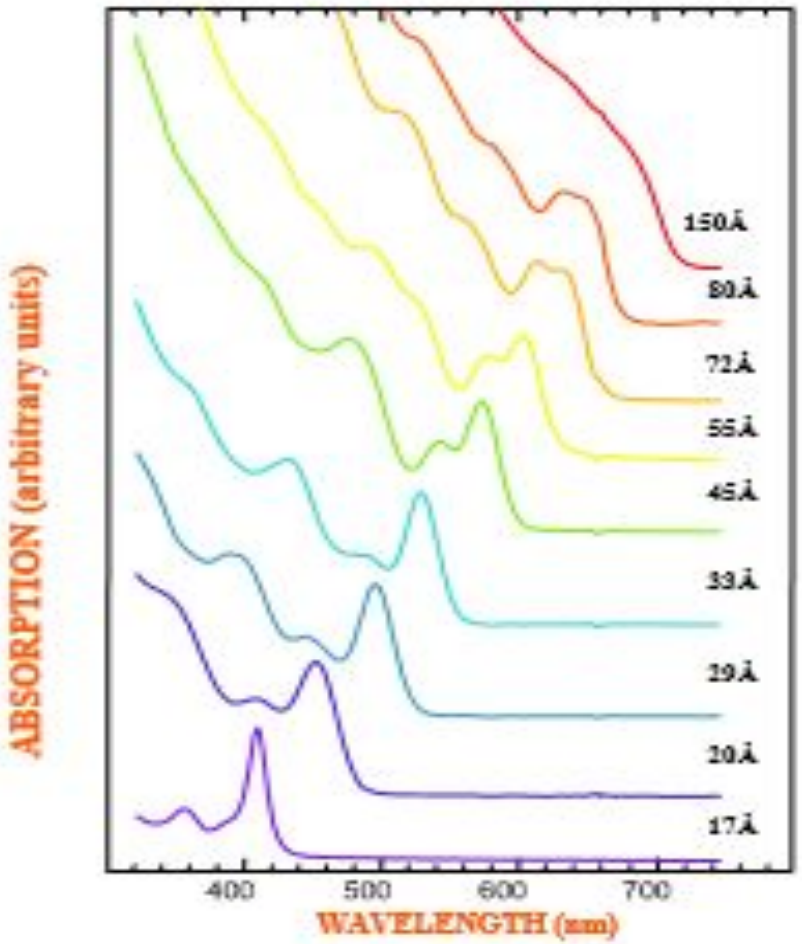
Способность производить нанокристаллы с относительно узким распределением по размерам является ключевым требованием к современным методам. Рассмотрим зависимость скорости роста от радиуса нано-кристаллов, показанной на рис. Левее r_c скорость роста отрицательна – частицы распадаются.

Правая часть кривой показывает, что более крупные кристаллы являются стабильными и растут. Но скорость роста у малых частиц больше, чем у больших. Пик скорости роста в зависимости от радиуса на правой стороне возникает из-за геометрического фактора: увеличение радиуса крупных кристаллов требует включения большего количества атомов, чем такое же увеличение радиуса более мелких кристаллов.

Фокусировка по размерам

Фокусировка по размерам нанокристаллов может происходить в двух различных режимах, "фокусировки" и "расфокусировки", в зависимости от концентрации присутствующих мономеров. Критический размер существует при любой данной концентрации мономера. При высокой концентрации мономера, критический размер мал, так что все частицы растут. В этой ситуации, когда более мелкие частицы растут быстрее, чем более крупные, как следствие, распределение по размерам может быть сфокусировано к почти монодисперсному.

Таким образом, распределение будет спонтанно узким или "в фокусе". Понятие фокусировки размерного распределения было четко продемонстрировано экспериментально. Размерная фокусировка является оптимальной, если концентрация мономера удерживается таким образом, что средний размер присутствующих нанокристаллов всегда немного больше критического размера (см. Рис.). Продолжительность стадии роста зависит от условий реакции.



Размерная зависимость спектра поглощения квантовых точек CdSe. Числа справа от каждого спектра представляют собой квантовый точечный диаметр.

C.B.Murray, D.J.Norris, M.G.Bawendi, (1995).

Созревание Оствальда

Если концентрация мономера находится ниже критического порога, небольшие нанокристаллы растворяются, в то время как более крупные растут и распределение по размерам расширяется - происходит расфокусировка. Результатом является Оствальд созревание, когда мелкие кристаллы уменьшаются, а крупные растут, что приводит к широкому, неравномерному распределению по размерам.

Процесс созревания Оствальда начинается, когда раствор истощён из-за роста частиц, при этом большие частицы продолжают расти за счёт растворения более мелких, уменьшая поверхностную энергию системы.

При уменьшении степени пересыщения критический размер зародышей растет, и частицы меньше этого критического размера растворяются. Если реакцию остановить на этой стадии - частицы будут иметь широкое распределение по размерам.

Созревание Оствальда хорошо описываеися с помощью Лифшица-Слёзова-Вагнера (LSW) модели, показывающей, что V пропорционален времени реакции t, где V представляет собой объем КТ.
Продолжительность этапа может варьироваться от нескольких часов до нескольких дней.

РАСТВОРИМОСТЬ НАНОЧАСТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ РАЗМЕРА

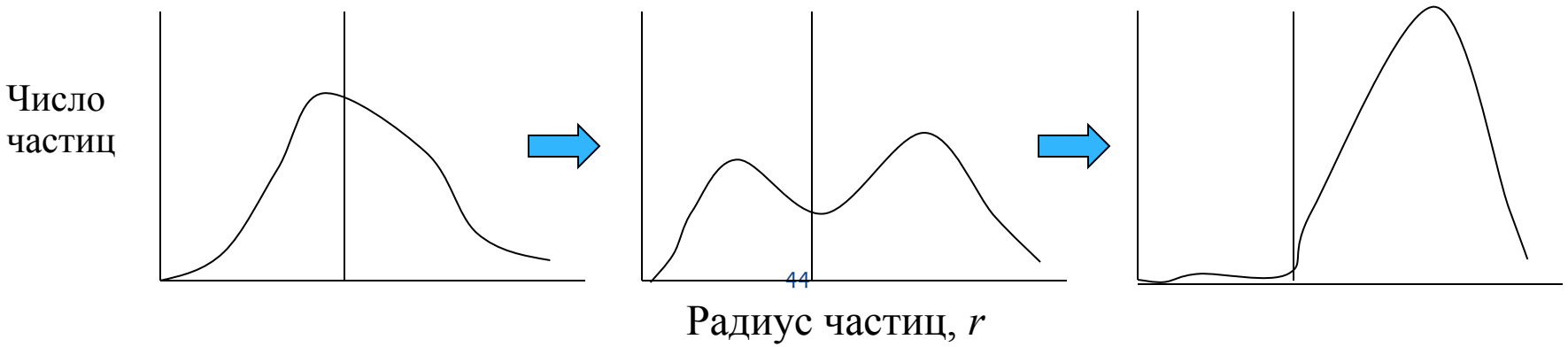
Вычисление размера частиц

$$S = S_0 \exp (2\gamma_{sl} V_m / R_g T r)$$

- S_0 = *Растворимость [M] для большой частицы,*
- S = *Растворимость [M] для частиц данного радиуса,*
- V_m = *Молярный объем твердой фазы,*
- r = *Радиус частиц,*
- R_g = *Константа для идеального газа,*
- T = *Температура,*
- γ_{sl} = *Поверхн. натяжение*

$$r = 2\gamma_{sl} V_m / R_g T \ln (S/S_0)$$

Эффект ***Оствальда*** - частицы меньшего размера имеют большую растворимость и за счет этого в растворе в условиях равновесия происходит их укрупнение



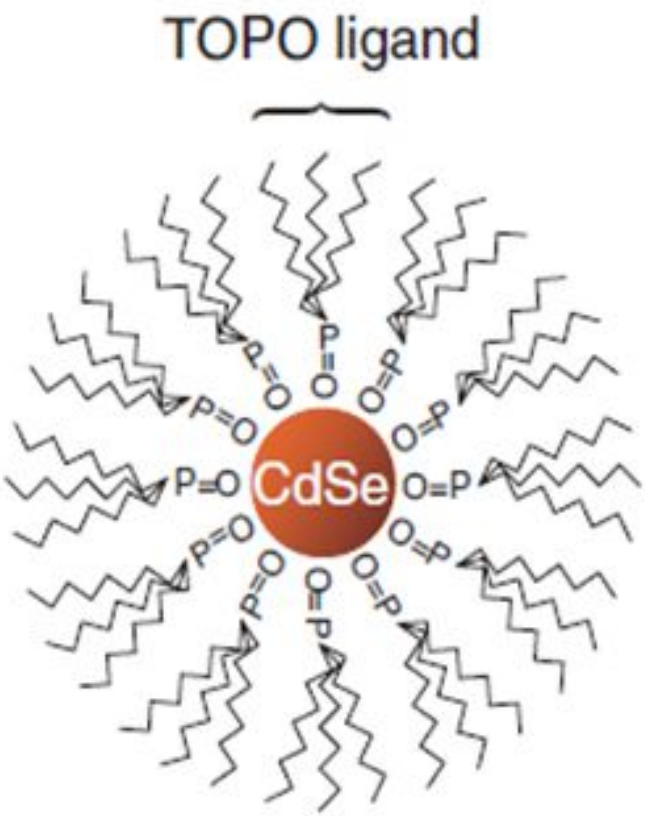
На этапе созревания Оствальда невозможно получить монодисперсные частицы. Размер оставшихся после полного исчезновения пересыщения частиц может достигать микрометров, поэтому нанокристаллы с хорошим распределением по размерам можно получить лишь при *взрывной нуклеации* и остановке реакции быстро после ее окончания и до начала созревания Оствальда. *Для взрывной нуклеации необходимо создавать высокую степень пересыщения.*

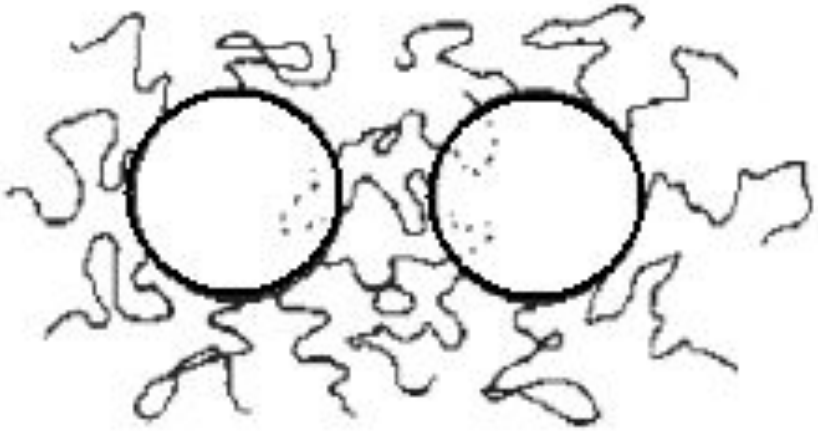
Стабилизация частиц.

Нам необходимо достичь не только заданной дисперсности, но и стабилизировать раствор во времени. Этого можно добиться за счет уменьшения энергии поверхностного натяжения на границе раздела фаз, что ведет к присутствию в системе кроме дисперсионной среды и дисперсной фазы еще одного компонента – стабилизатора дисперсной системы (ПАВ). Адсорбируясь на границе раздела фаз, он создает структурно-механический барьер и таким образом препятствует агрегации. Именно удачный выбор стабилизатора имеет решающее значение в коллоидном синтезе КТ.

Стабилизатор,

во-первых, должен предотвращать агрегацию частиц дисперсной фазы. Во-вторых, не препятствовать диффузионному росту КТ. В-третьих, ориентируясь на поверхности коллоидной частицы, молекулы стабилизатора должны быть крепко с ней связаны ковалентной связью с одной стороны, в то время как свободный конец молекулы должен иметь сильное сродство к растворителю, то есть к дисперсионной среде, обеспечивая тем самым достаточно высокую ” растворимость” КТ. А в-четвертых, молекулы стабилизатора должны пассивировать поверхность КТ, устраняя оборванные связи и локализуя внутри нее носители заряда.


TOPO ligand
CdSe
P=O
O=P



Возможными органическими стабилизаторами могут выступать:

1) **Амины** – соединения, являющиеся продуктами замещения водорода в аммиаке органическими радикалами.

2) **Тиоспирты (тиолы)** – аналоги обычных спиртов, в молекулах которых вместо кислородного атома содержится атом серы. Тиоспирты плохо растворяются в воде, но хорошо – во многих органических растворителях.

Тиоспирты можно рассматривать как органические производные сероводорода, в которых один или два атома водорода замещены предельными углеводородными радикалами: *R-SH* и *R-S-R* соответственно. Сами соединения называют обычно по заместительной и радикало-функциональной номенклатурам ИЮПАК. Например:

$CH_3\text{-}SH$

$CH_3\text{-}\underset{\underset{SH}{|}}{CH}\text{-}CH_2\text{-}CH_3$

$CH_3\text{-}S\text{-}\underset{\underset{CH_3}{|}}{CH}\text{-}CH_2\text{-}CH_3$

метантиол, бутантиол-2, 2-метилтиобутан,
метилмеркаптан

втор-бутилмеркаптан

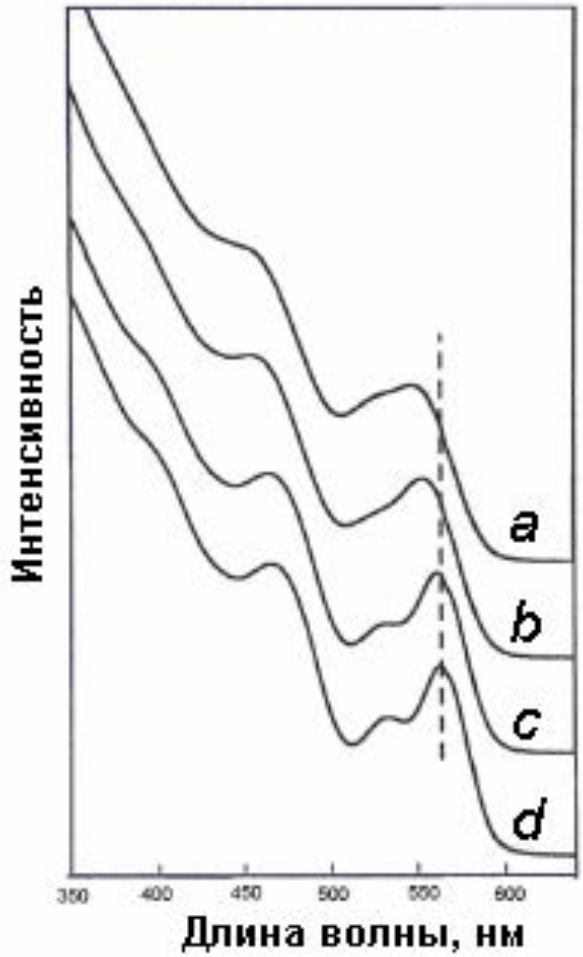
метил-*втор*-бутилсульфид

3) Наиболее перспективными стабилизаторами выступает **класс карбоновых кислот**, а точнее ряд длинноцепочечных (жирных) кислот. Атомом, осуществляющим стабилизацию, выступает кислород в гидроксильной группе. Одним из лучших стабилизаторов этого класса является **олеиновая кислота:** $C_{17}H_{33}COOH$

4) **Фосфинхалькогениды**, например, триоктилфосфин-халькогениды TOP-S, TOP-Se TOP-Te.

Размерно-селективное осаждение.

«Растворимость» КТ разного размера различна. На этом явлении основан метод размерно-селективного осаждения (РСО). Более крупные частицы можно осадить и получить раствор практически одинаковых по размеру частиц. В настоящее время удаётся отделить квантовые точки с диаметрами, различающимися всего на несколько процентов. Полученная дисперсия среднего размера составляет 5-10% в зависимости от состава используемого полупроводника.



Эффективность размерно-селективного осаждения на примере спектра поглощения нанокристаллов CdSe:

a – спектр поглощения нанокристаллов в реакционной смеси до РСО,

b - спектр поглощения нанокристаллов после одного РСО метанолом,

c – спектр нанокристаллов после редиспергирования в бутаноле и повторного РСО метанолом,

d – спектр после РСО из смеси бутанол/метанол.

Очистка коллоидного раствора

Непосредственно после того, как получен коллоидный раствор, содержащий частицы нужных размеров, его необходимо очистить от побочных продуктов и не прореагировавших компонентов, чтобы остановить рост частиц, который медленно может продолжаться при комнатной температуре и получить коллоидный раствор, содержащий только частицы и растворитель.

Решение задачи состоит во введении сильно полярного вещества – *осадителя*, чаще всего безводного *метанола*. Частицы из-за покрывающих их молекул ПАВ, обращенных гидрофобной частью в раствор, неустойчивы в среде полярного растворителя и *флокулируют* (выпадают в осадок), в то время как легкие молекулы и ионы непрореагировавших веществ остаются в растворе.

Флокуляцию ускоряют за счет центрифугирования раствора. Аналогичный подход может быть применен для разделения частиц по размеру. При введении меньшего количества осадителя в первую очередь флокулируют самые крупные частицы, поскольку между ними сильнее взаимодействие Ван-дер-Ваальса. Для этого в очищенный раствор КТ медленно добавляется осадитель до появления опалесценции (рассеяния света), означающей начало образования флокулята.

Выделение фракций

Отделяя центрифугированием осадок (более крупные частицы) и раствор (более мелкие) и заново диспергируя осадок, можно получить два коллоидных раствора с меньшим разбросом размеров частиц, чем в исходном. Повторение этой процедуры позволяет получить растворы частиц со все более узкой дисперсией размеров.

Стабилизация квантовой точки

На заключительном этапе производства КТ полученные нанокристаллы сверху покрывают материалом с широкой запрещенной зоной, например ZnS или CdS. Для этого в реакционную смесь медленно добавляют раствор, содержащий диэтил цинка $Zn(Et)_2$ и триметилсилансульфид $(CH_3)_3Si\text{-}S\text{-}Si(CH_3)_3$.

Et - $C_4H_{10}O$ - Aether diaethylicus (Диэтиловый эфир)

Схематическая иллюстрация:

(a)КТ, покрытая ПАВ.

(b) КТ, пассивированная неорганической оболочкой (структура КТ ядро / оболочка).

(c) зонная диаграмма, показывает запрещенную зону ядра и оболочки неорганически пассивированных КТ.

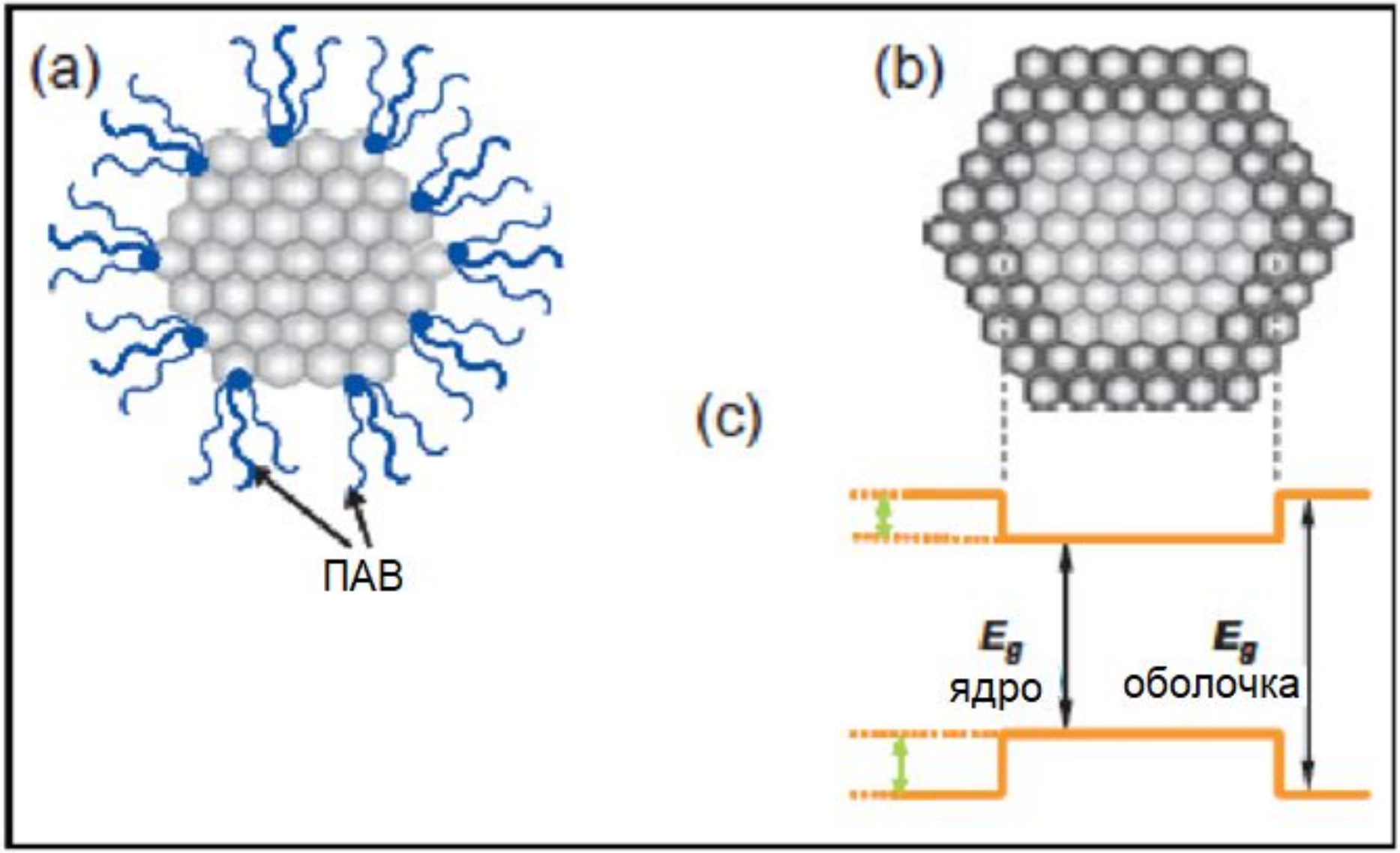
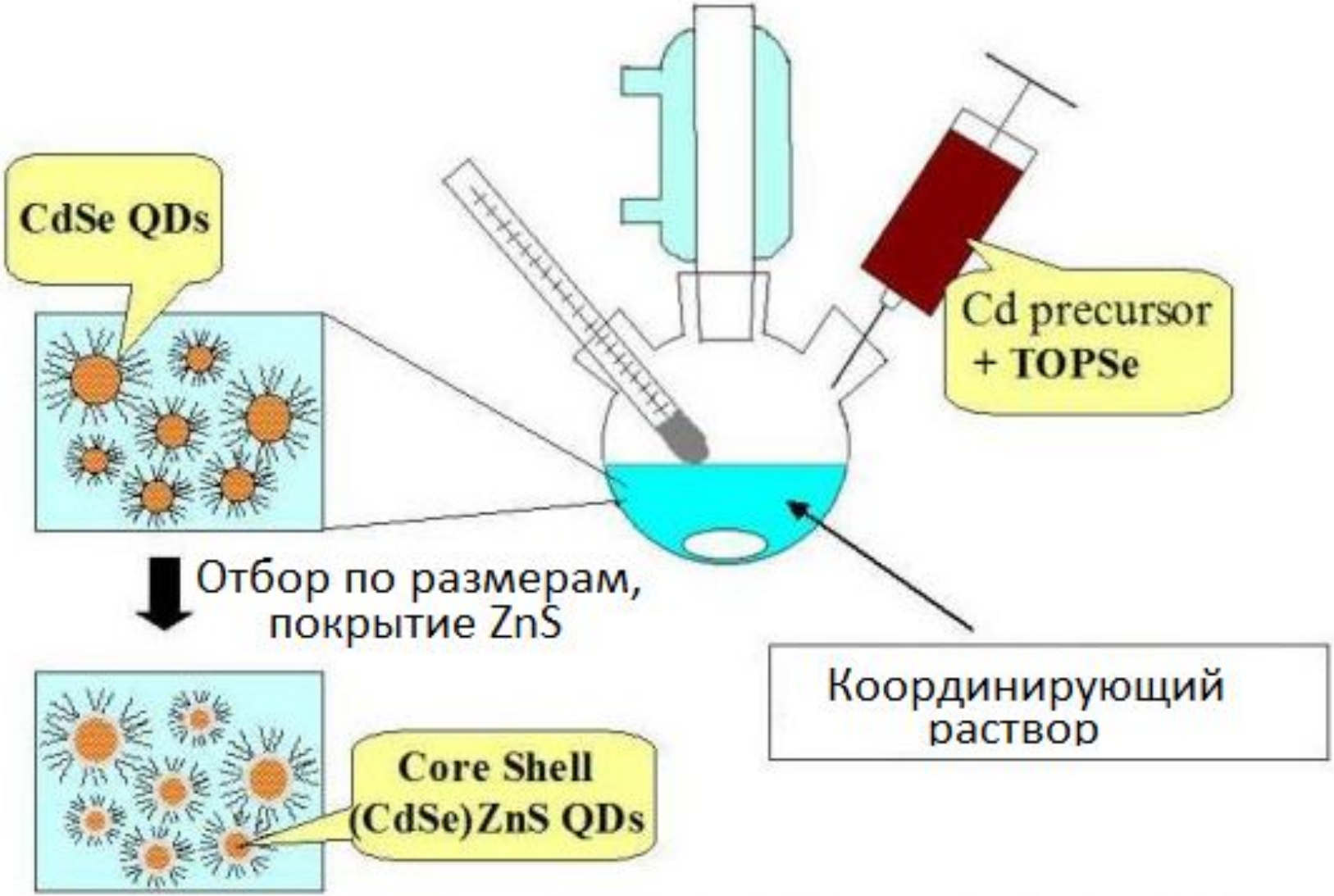

(a)
ПАВ
(b)
(c)
E_g
ядро
E_g
оболочка

Схема синтеза квантовых точек CdSe



(CdTe are prepared by Method with TOP=Te, injection T. ~240 ℃, growth T. 190-220 ℃)

Коротко о коллоидном синтезе CdSe: соединение кадмия нагревают до 320 °C и растворяют в органическом растворителе. В реакционный сосуд вводят селеновое соединение комнатной температуры, растворенное в дистиллированном органическом растворителе, вызывая пересыщение полученного раствора CdSe. По мере того, как температура опускается до 290 °C, происходит зарождение новых кристаллов и растут существующие кристаллы. После периода роста, длина которого определяет размер квантовых точек, раствор охлаждается до 220 °C, останавливая рост. Небольшое количество сульфида цинка вводят в реакционный сосуд для покрытия квантовых точек и предотвращения их взаимодействия с окружающей средой.

Заключение

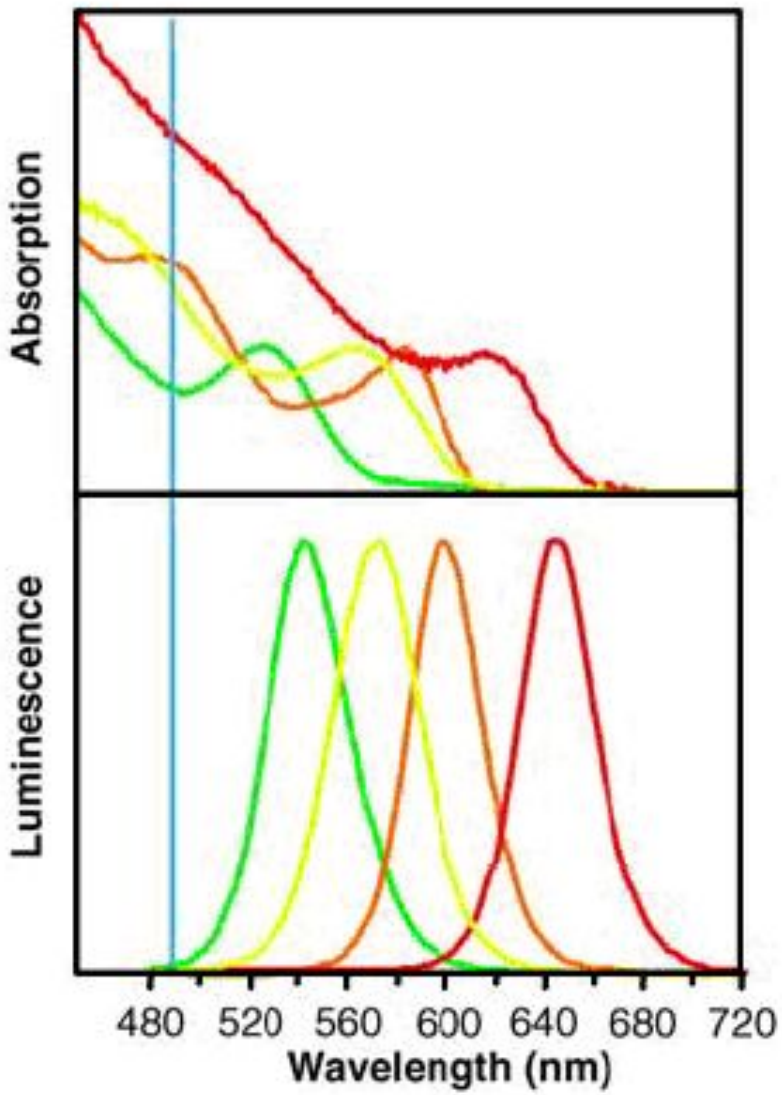
Бесспорным преимуществом метода коллоидного синтеза является возможность массового производства квантовых точек в любых необходимых количествах. Возможность гибкого управления технологическими параметрами производственного процесса позволяет получать КТ с небольшим разбросом геометрических параметров и широким спектром поглощения.

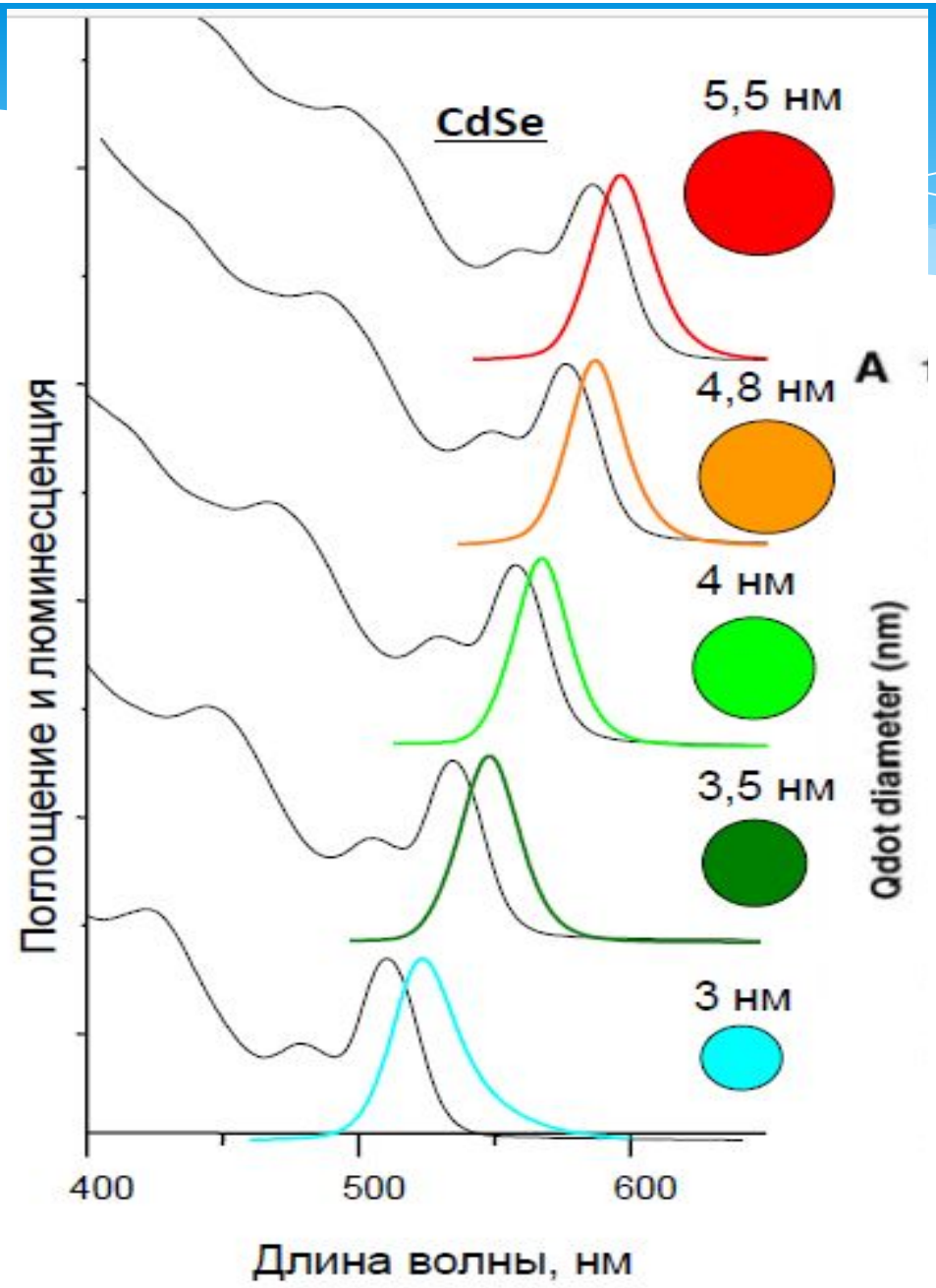
К недостаткам этого метода следует отнести необходимость во многих случаях эмпирически подбирать параметры технологического процесса.

КТ можно использовать практически во всех сферах, в которых нашли широкое применение современные полупроводники, например, в области производства высокопроизводительных солнечных батарей, светоизлучающих и фотодиодов, фотодетекторов и даже одноэлектронных транзисторов. Однако специфические особенности КТ значительно расширяют спектр их применения. Флюоресцирующие маркеры на основе КТ можно использовать для получения изображения глубоко залегающих тканей. Например, если ввести внутривенно взвесь квантовых точек с зеленым спектром излучения, то через кожу станет видна сеть кровеносных сосудов в виде характерного зеленого «деревца». Таким образом, можно легко диагностировать поврежденные сосуды и аневризмы.

На основе КТ можно изготавливать светодиоды повышенной яркости, а также специальные покрытия для существующих источников света, корригирующие спектр излучения. Не секрет, что люминесцентные лампы обладают слишком «холодным» спектром излучения. Многочисленные попытки откорректировать спектр с помощью светофильтров и специальных отражателей серьезного успеха до сих пор не имели. В исследовании Майкла Бауэрса из университета Вандербильта показана возможность создания полимерного покрытия из смеси КТ с полиуретаном, которое позволяет сдвигать спектр излучения синего светодиода в желтую сторону, делая его похожим на спектр излучения традиционных ламп накаливания.

Характерные особенности КТ — весьма широкий спектр поглощения и узкий спектр излучения, благодаря чему удается строить флюоресцирующие системы в широком диапазоне от УФ до ИК частей спектра.




CdSe
5,5 нм
4,8 нм
4 нм
3,5 нм
3 нм
A
Qdot diameter (nm)
Поглощение и люминесценция
400
500
600
Длина волны, нм