

В.С. Гурин, М.В. Артемьев

СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из “горячих” и интенсивно развивающихся в последнее десятилетие направлений в физике и химии твердого тела является разработка методов синтеза и изучение фотофизических и фотохимических свойств нанокристаллов (частиц с размером менее 100 нм) различных полупроводниковых соединений [1–6]. Интерес к данным объектам определяется, главным образом, проявлением двух эффектов в таких ультрамалых частицах твердого тела: квантоворазмерным эффектом и эффектом поверхности или границы раздела фаз [3–8]. Квантоворазмерный эффект проявляется тогда, когда размер полупроводникового нанокристалла приближается к характеристической длине — боровскому радиусу экситона (возбужденной электронно-дырочной пары, связанной кулоновским взаимодействием) или меньше этой величины. В этом случае волновые функции электрона и дырки ограничиваются объемом нанокристалла, что, согласно классической проблеме “частицы в потенциальном ящике”, приводит к возрастанию энергии возбужденного состояния (экситона). На практике это выражается в спектральном сдвиге края оптического поглощения в область больших энергий фотона (“посинению спектра”) с уменьшением размеров полупроводниковых нанокристаллов. Более того, в случае прямозонных полупроводниковых соединений, таких, как CdS, CdSe, PbS, других соединений II-VI, IV-VI элементов, спектры поглощения соответствующих квантоворазмерных нанокристаллов представляют собой набор дискретных полос (водородоподобные энергетические уровни) [4–16].

Помимо чисто научного интереса к фундаментальным свойствам таких “искусственных водородоподобных атомов” (“artificial atom” — термин, введенный первоначально в англоязычной литературе и не являющийся бесспорным), зависимость оптических свойств полупроводниковых нанок-

ристаллов от их размера позволяет использовать их как элементы пассивных и активных оптических устройств с регулируемыми параметрами. В частности, квантоворазмерные нанокристаллы PbS, PbSe, CdTe и др. обладают значительной нелинейной оптической восприимчивостью [3–6], что позволяет использовать их в качестве материалов для пассивных оптических затворов для генерации ультракоротких лазерных импульсов в ближней ИК области, причем спектральная область функционирования таких затворов может регулироваться изменением размеров нанокристаллов.

Квантоворазмерные нанокристаллы прямозонных полупроводников CdS, CdSe, ZnSe, CdTe и др. обладают также ярко выраженной фотолюминесценцией в видимой области спектра, интенсивность которой в большинстве случаев значительно превышает таковую для объемных материалов [10–16]. Помимо влияния эффекта размерного квантования, в данном случае существенную роль оказывают поверхностные состояния. При размерах нанокристалла менее 3–4 нм, что соответствует примерно всего нескольким сотням атомов, значительная часть их оказывается на поверхности нанокристалла, что обуславливает существенное влияние границы раздела фаз нанокристалл-раствор, нанокристалл-газ на их оптические свойства. В частности, наличие на поверхности реального нанокристалла ненасыщенных связей, инородных (примесных) атомов, непосредственное соседство с молекулами растворителя приводит к заметному тушению, а в ряде случаев, наоборот, увеличению квантового выхода фотолюминесценции нанокристаллов. Таким образом, контролируемая модификация поверхности полупроводниковых нанокристаллов представляет собой удобный метод получения новых нанокристаллических материалов с регулируемыми физическими и химическими свойствами.

В данном обзоре собраны наиболее интересные с точки зрения авторов результаты исследования методов получения и физико-химических свойств ряда полупроводниковых нанокристаллов, проводившихся ими в НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета в течение ряда последних лет.

1. НАНОКРИСТАЛЛЫ II-VI, IV-VI И I-VII СОЕДИНЕНИЙ: СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Наиболее простым методом получения нанокристаллов II-VI соединений является реакция между ионами металла (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Hg^{2+}) и халькогена (S^{2-} , Se^{2-} , Te^{2-}) в растворе с образованием коллоидных частиц соответствующих халькогенидов металлов. В качестве растворителя чаще

всего используется вода, метанол, этанол, диметилсульфоксид и др. Для стабилизации образующихся коллоидных растворов в раствор вводят растворимый полимер: поливиниловый спирт, поливинилпирролидон, полифосфат натрия. К недостаткам указанного метода следует отнести существенную полидисперсность образующихся нанокристаллов, а также энергичное окисление прекурсоров селена и теллура (H_2Se , H_2Te , Na_2Se , Na_2Te и др.). В силу указанных обстоятельств нанокристаллы сульфида кадмия явились наиболее популярным и удобным объектом на начальных этапах исследования квантоворазмерных свойств. Значительная полидисперсность получаемых указанным методом нанокристаллов CdS мешает наблюдению тонких оптических эффектов, связанных с размерным квантованием энергии электронно-дырочных пар. Существенное уширение экситонных полос поглощения, наблюдавшееся авторами в [17] на образцах нанокристаллов CdS в тонких пленках поливинилового спирта, полученных из водных и ацетонитрильных коллоидных растворов, не позволило разрешить спектры поглощения на отдельные оптические переходы, связанные с различными дискретными энергетическими уровнями, полученными квантовохимическими расчетами (расширенный метод Хюккеля) для некоторых кластеров состава $Cd_6S_8 - Cd_{54}S_{63}$.

Данные о зависимости однородного уширения дискретных оптических переходов в зависимости от энергии фотона в полупроводниковых нанокристаллах могут быть получены при использовании метода спектрального выжигания провала. При действии короткопulsного лазерного излучения на систему поглотителей с узкими спектральными линиями, имеющими конечное распределение по энергии (неоднородное уширение), возможно насыщение тех оптических переходов, которые соответствуют энергии фотона лазерного излучения. При этом в спектрах поглощения наблюдается появление спектрального провала на частоте лазерного излучения, который может быть перманентным в случае протекания необратимых фотохимических превращений либо обратимым во временном интервале, равном времени жизни возбужденных носителей. В последнем случае применяют методы ультракороткой (нано- и фемтосекундной) лазерной спектроскопии. В силу высокой фотохимической активности нанокристаллов CdS, обусловленной их малыми размерами, удалось наблюдать перманентное фотохимическое спектральное выжигание провала в ансамблях нанокристаллов как в растворе 2-пропанола, так и в матрице поливинилпирролидона [17, 18]. Ширина спектральных провалов, определенная из дифференциальных спектров поглощения, соответствует однородному уширению экситонного поглощения нанокристаллов CdS с энергией, соответствующей энергиям фотонов возбуждающего лазерного излучения. Возможность получения достаточно узких спектральных

провалов на разных длинах волн на пленочном образце с нанокристаллами CdS позволяет использовать их в качестве фотохимической регистрирующей среды большой емкости (в голографическом режиме).

Получение монодисперсных нанокристаллов II-VI полупроводников с ярко выраженными дискретными оптическими переходами (отсутствие неоднородного уширения) возможно путем химического контроля размеров формирующихся нанокристаллов. В частности, дополнительное введение в реакционную смесь веществ, молекулы которых образуют прочные устойчивые комплексы с ионами Cd, Zn, Hg (меркаптосоединения, амины, фосфины и др.), приводит к формированию нанокристаллов и малоатомных кластеров II-VI соединений строго определенных, так называемых “магических” размеров [12–16]. Присутствие молекул тиоглицерина в коллоидном растворе формирующихся нанокристаллов CdS приводит к образованию частиц со средним размером 1,8–2 нм. В спектре поглощения таких нанокристаллов наблюдается ярко выраженная полоса экситонного поглощения в области ближнего УФ (340–360 нм) [19]. Рентгенодифракционный анализ сухого порошка осажденных нанокристаллов показывает, что даже такие сверхмалые частицы все еще обладают кристаллической структурой объемного CdS. Наличие на поверхности нанокристаллов CdS меркаптогрупп, химически связанных с атомами кадмия, приводит к образованию поверхностных состояний внутри запрещенной зоны, через которые возможна излучательная рекомбинация оптически возбужденных экситонов. Это приводит к возникновению интенсивных полос фотолюминесценции, характеризующихся большим стоксовским (длинноволновым) сдвигом. В частности, нанокристаллы CdS размером 2 нм с поверхностной оболочкой из молекул тиоглицерина обладают яркой фотолюминесценцией при комнатной температуре с максимумом вблизи 2,6 эВ (максимум поглощения лежит на 3,75 эВ) [19].

В общем случае формирование оболочки из меркаптосоединений на поверхности нанокристаллов CdS, CdSe, ZnS, ZnSe приводит к тушению собственной экситонной люминесценции (которая зачастую является весьма слабой) и возникновению интенсивной примесной эмиссии. Использование же в качестве молекул-стабилизаторов роста нанокристаллов II-VI соединений органических аминов или фосфинов позволяет наблюдать интенсивную экситонную люминесценцию при комнатной температуре. Молекулы указанного класса, химически связанные с поверхностными атомами металла, не формируют примесных состояний внутри запрещенной зоны нанокристалла. Синтез нанокристаллов CdSe в среде моноэтаноламина предположительно приводит к формированию малоатомных кластеров $(\text{CdSe})_{50}(\text{L}_n)$, обладающих дискретным спектром поглощения в растворе и интенсивной экситонной люминесценцией с малым стоксовским сдви-

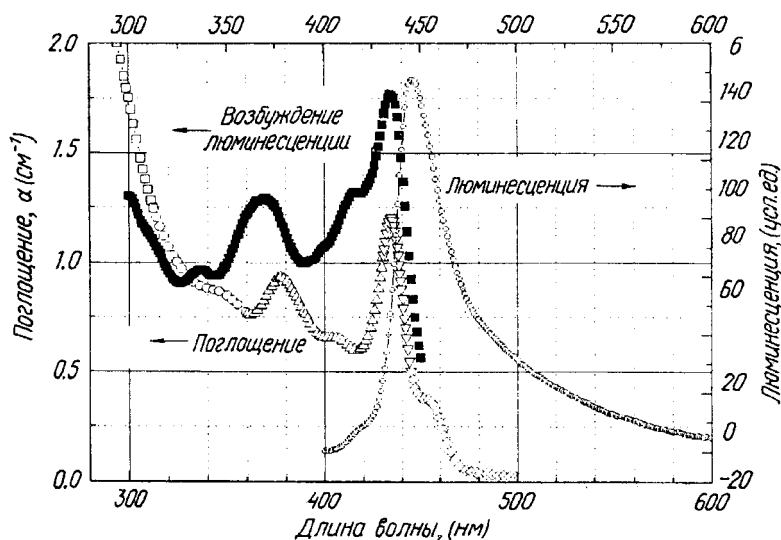


Рис. 1. Спектры поглощения, люминесценции ($\lambda_{\text{возб}} = 370$ нм) и возбуждения люминесценции ($\lambda_{\text{чист}} = 446$ нм) нанокристаллов CdSe, синтезированных в среде моноэтаноламина (авторы благодарят д-ра физ.-мат. наук С.В. Гапоненко и Л.И. Гуриновича за помощь в регистрации спектров фотолюминесценции)

гом (рис. 1). Аналогичные эффекты наблюдались и для других аминов и фосфинов, применявшихся в качестве стабилизаторов роста [20, 21].

Рассмотренные выше методы синтеза были использованы для получения нанокристаллов и других соединений, в частности IV-VI, VII-VI (PbS, PbSe, MnS, MnSe и др.). Синтез нанокристаллов PbS в водной среде в присутствии поливинилового спирта в качестве полимера-стабилизатора обменной реакцией между ацетатом свинца и сульфидом натрия дает квантоворазмерные частицы с достаточно узким распределением по размерам так, что в спектрах поглощения отчетливо регистрируются две и более полосы экситонного поглощения в области 700 нм и ниже, что соответствует квантоворазмерному сдвигу энергий экситонных переходов более чем на 1 эВ. Попытки синтеза нанокристаллов PbS в присутствии тиоглицерина, цистеина, меркаптоэтанола в качестве стабилизаторов роста оказались неудачными вследствие быстрой коагуляции нанокристаллов. Отсутствие стабилизирующего эффекта в случае PbS, характерного для CdS, связано, по-видимому, с различной кристаллической структурой этих соединений. Поверхность нанокристаллов CdS со структурой вюрцита в основном сформирована, по-видимому, атомами кадмия, и молекулы меркаптосоединений легко связываются с ними, образуя ста-

билизирующую оболочку. Кристаллическая структура нанокристаллов PbS иная (структура каменной соли), и поверхность нанокристаллов может быть образована, главным образом, атомами серы так, что меркаптогруппы не могут быть связаны химически с поверхностью нанокристаллов. Отсюда вытекает и отсутствие стабилизирующего эффекта меркаптосоединений. Аналогичный результат наблюдался и для других нанокристаллов (CuS, Cu₂S, CuInS₂, MnS), синтезированных в различных полярных растворителях (вода, диметилсульфоксид) в присутствии триглицерина. Устойчивые коллоидные растворы указанных соединений удалось получить при введении дополнительно полимера-стабилизатора (поливиниловый спирт, поливинилпирролидон).

Проведен успешный синтез и изучены структура и оптические свойства нанокристаллов IV-VII элементов (иодид свинца). Нанокристаллы PbI₂ вызывают интерес как представители класса кластеров со слоистой структурой (кристаллы состоят из чередующихся слоев I-Pb-I...I-Pb-I...). Иодид свинца является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 2,5 эВ. Оптические экситонные переходы в иодиде свинца попадают на видимую область, что удобно для изучения различных оптических эффектов, связанных с размерным квантованием. Ввиду частичной растворимости иодида свинца в горячей (100°C) воде, нанокристаллы PbI₂ формировались при быстром охлаждении до комнатной температуры кипящего насыщенного водного раствора порошка иодида свинца, содержащего 0,5% поливинилового спирта в качестве стабилизатора. Пленочные образцы, содержавшие нанокристаллы PbI₂, получались поливом коллоидного раствора на стекла. Спектры поглощения этих образцов характеризуются наличием резкого пика экситонного поглощения в области 3 эВ, что дает квантоворазмерный сдвиг в 1,5 эВ. Рентгенографическое исследование показало, что изучавшиеся образцы представляют собой плоские гексагональные кристаллы "магического" размера толщиной в один слой I-Pb-I, что и обуславливает сильный эффект размерного квантования в поперечном направлении [22]. Поскольку все атомы иода находятся на поверхности нанокристалла, то можно сделать заключение, что экситон в данном случае представляет собой пару "дырка, локализованная на поверхности (ионах иода)-электрон на ионах свинца". Такая возбужденная конфигурация является исключительно чувствительной к окружению. В частности, интенсивность экситонной люминесценции нанокристаллов PbI₂ зависит от давления кислорода. Увеличение концентрации кислорода, являющегося хорошо известным акцептором фотовозбужденных электронов, приводит к заметному тушению люминесценции. Этот результат позволяет заключить, что пленочные материалы, содержащие квантоворазмерные нанокристаллы PbI₂ и других аналогичных соедине-

ний, могут быть использованы в качестве оптических сенсоров давления кислорода и ряда других газов.

2. НАНОКРИСТАЛЛЫ СУЛЬФИДОВ МЕДИ И ТРОЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Общая методика синтеза полупроводниковых наночастиц сульфидов меди, как и большинства вышеописанных других бинарных соединений, основана на реакции обмена между ионами Cu(I) либо Cu(II) и сульфид- либо селенид-ионами в растворе (в ряде случаев используются органические серу- и селеносодержащие соединения, которые имеют активный халькоген, действующий аналогично S^{2-} , Se^{2-} -ионам). Кроме того, для приготовления стабильных образцов, являющихся моделью оптических элементов, производилась стабилизация нанокристаллов в полимерных пленках, в которых иммобилизованные частицы оставались без изменений (по оптическим характеристикам и химическому составу) в течение достаточно длительного времени (не менее нескольких месяцев) [23, 24]. Таким образом получались нанокристаллы сульфидов меди различной стехиометрии — Cu_xS ($1 \leq x \leq 2$) и тройные сульфиды и селениды состава $Cu-M(III)-X$, где $M(III)$ — Ga, In, Fe; X — S, Se. Размеры частиц колебались от 1–3 нм до десятков нм в зависимости от условий синтеза и определялись как по электронно-микроскопическим данным, так и по уширению соответствующих рефлексов рентгенограмм для осадков, выделенных в результате коагуляции коллоидов. Факт образования соответствующих фаз при выбранных условиях синтеза подтверждался рентгенографически для указанных осадков, а также по электронограммам частиц, выделенных непосредственно из коллоидного раствора. Следует заметить, что если в случае бинарных полупроводниковых соединений, рассмотренных в предыдущем разделе, образование соответствующих фаз происходит в широком интервале условий синтеза, то в случае сульфидов меди, и в особенности тройных соединений, требуются более жесткие условия (выбор растворителя, концентрации, величины pH, химической формы исходной Cu(I) либо Cu(II)) для образования тех или иных соединений [25–27]. Так, нанофаза тройного соединения $CuAlS_2$ не была получена, а в случае системы Cu-Fe-S наблюдалось образование также и составов Cu_3FeS_4 и $CuFe_2S_3$ с оптическими свойствами, отличающимися от стехиометрического халькопирита $CuFeS_2$.

Согласно оптическим спектрам коллоидов и пленок, содержащих CuS (рис. 2) квантоворазмерный эффект для них практически не проявляется (при размерах 5–10 нм и более), и основной характеристикой

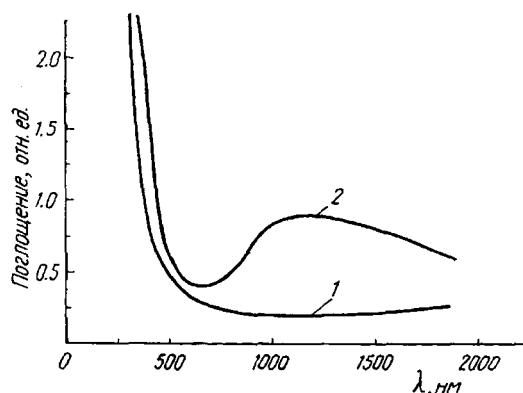


Рис. 2. Типичный спектр поглощения коллоидов и полимерных пленок, содержащих нанокристаллы CuS: 1—свежеприготовленных; 2—частично окисленных

спектра является достаточно пологий край фундаментального поглощения, соответствующий $E_g \sim 2,2$ эВ. Однако весьма существенным свойством медьсодержащих нанокристаллов, отличающих их от таковых для II-VI, IV-VI и I-VII соединений, является возможность изменения характера оптического поглощения (без изменения кристаллической структуры и размера) при частичном окислении (путем нагрева водного коллоида до 60–80°C либо при хранении при доступе воздуха в течение нескольких суток). При этом цвет коллоида изменяется от коричневого до темно-зеленого, и на спектре поглощения появляется широкая полоса с максимумом в ближней ИК области, а поглощение вблизи фундаментального края практически не изменяется, что указывает на частичный поверхностный характер окисления наночастиц CuS. О факте поверхностного окисления наночастиц (были получены данные для CuS и CuInS₂) свидетельствуют также данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) [26]. Указанный эффект, проиллюстрированный на рис. 2 для CuS, справедлив также для Cu₂S, CuInS₂, CuFeS₂, но селениды претерпевают полное окисление с разрушением нанокристаллических фаз халькогенидов.

На рис. 3 представлены спектры поглощения для коллоидов и полимерных пленок, содержащих частицы ряда тройных соединений, и показано смещение спектра по сравнению со спектром массивного полупроводника. Значительный квантоворазмерный эффект в смещении края поглощения имеет место для всех соединений, но в наибольшей степени для CuInS₂ наряду с появлением широкого “хвоста” в длинноволновой области спектра. Оценка величины квантоворазмерного смещения края фундаментального поглощения с учетом значений эффективных масс

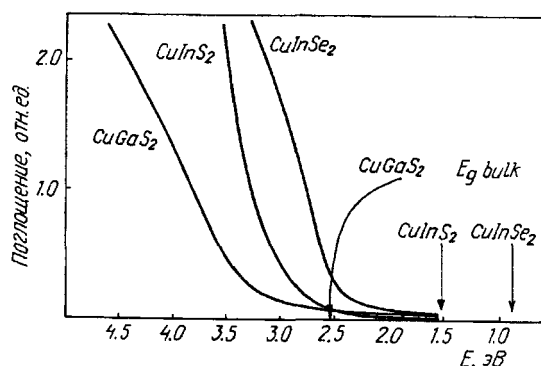


Рис. 3. Спектры поглощения коллоидов, содержащих нанокристаллы ряда соединений CuM(III)X_2 , и величины ширины запрещенной зоны E_g соответствующих массивных полупроводников

CuInS_2 дает смещение около 0,5 эВ для частиц размером 2 нм, что несколько меньше, чем значения смещения, которые можно оценить из экспериментальных спектров. Наблюдаемое смещение нельзя отнести к проявлению только квантоворазмерного эффекта, а следует иметь в виду возможное изменение поверхности ультрадисперсных частиц, получаемых из растворов, по сравнению с массивным кристаллическим полупроводником. Пологий характер спектра поглощения и отсутствие выраженных деталей на нем могут быть связаны с проявлением непрямых переходов в соответствии с усложненной по сравнению с полупроводниками класса II-VI зонной структурой.

3. ОКСИДНЫЕ МАТРИЦЫ С ИММОБИЛИЗОВАННЫМИ НАНОКРИСТАЛЛАМИ CuS , CuSe И CuInS_2

Одним из вариантов создания твердотельных материалов, содержащих наночастицы полупроводников, обуславливающих свойства материала, является иммобилизация их в прозрачных матрицах, формирующих стабильные пленки либо объемные стеклообразные образцы. Создание таких материалов открывает прямой путь для практического применения уникальных оптических и электрофизических свойств систем, содержащих нанокристаллы полупроводников. Мы остановимся на оригинальной технологии получения оксидных (на основе SiO_2 , TiO_2) пленок и стекол с наночастицами Cu_xS , CuSe , CuInS_2 , PbS и др., разрабатываемой совместно с сотрудниками Гомельского государственного уни-

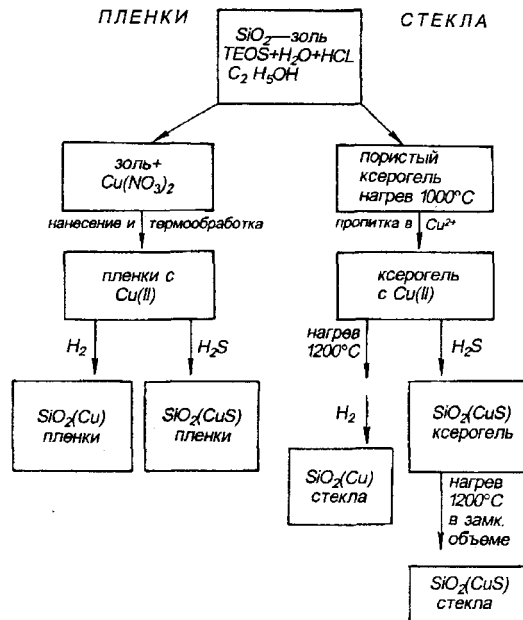


Рис. 4. Схема получения пленок и стекол золь-гель методом

верситета [28]. Технология основана на реализации достаточно распространенного в настоящее время золь-гель метода, разработанного с учетом специфики указанного ряда полупроводников и задач нелинейной оптики [29–32]. Общая схема процесса представлена на рис. 4, и ее реализация позволяет получать оптически однородные и стабильные пленки толщиной до нескольких микрон на различных подложках, а также объемные образцы стекол произвольного размера. Формирование нанокристаллов сульфидов и селенидов и восстановленных металлов производится путем химической трансформации прекурсоров-солей металлов и оксидов, иммобилизованных в матрицы пленок либо в SiO_2 -ксерогели, за счет взаимодействия с газообразными H_2S , Se , H_2 . Процесс формирования нанокристаллов полупроводников по указанной схеме был исследован с использованием комплекса физико-химических методов: рентгенографии, электронной микроскопии, РФЭС, обратного резерфордского рассеяния–и были определены условия, при которых образуются стехиометрические халькогениды CuS , CuSe , CuInS_2 и др., причем размер частиц существенно уменьшается при трансформации прекурсоров в халькогениды (до 10–20 нм и менее). На спектрах оптического поглощения (рис. 5) аналогично рассмотренным выше случаям для коллоидов

отмечаются дополнительные полосы поглощения в конце видимой и ближней ИК области. Данные РФЭС свидетельствуют об образовании при этом сложной химической формы меди (включающей Cu(I) и Cu(II)). Предварительные исследования методом пикосекундной спектроскопии (совместно с МЛЦ БГПА) стеклообразных материалов, полученных описанным способом, показывают нетривиальный характер нелинейно-оптического отклика, существенно отличающегося от такового для традиционных стекол с нанокристаллами II-VI и I-VII полупроводников.

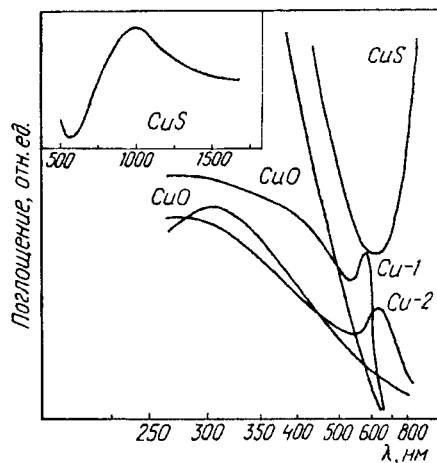


Рис. 5. Спектры поглощения пленок SiO_2 , содержащих нанокристаллы CuO, CuS, Cu

Заключение

Разработанные методы синтеза нанокристаллов различных полупроводниковых соединений и внедрения их в прозрачные матрицы позволяют получать наночастицы соединений различной химической природы, ряд методик являются оригинальными подходами и разработаны впервые в коллективе Белгосуниверситета. В настоящее время продолжается дальнейшая их разработка, которая позволяет конструировать новые оптические материалы и устройства, реализующие уникальные характеристики квантоворазмерных структур. Возможность регулирования оптических свойств полупроводниковых нанокристаллов позволяет надеяться на их конкурентоспособность с пласманными полупроводниковыми структурами (сверхрешетки, эпитаксиальные слои и др.) для изготовления пассивных и активных оптических затворов, светофильтров, фото- и электролюминесцентных материалов. Научное значение работ в этом направлении состоит в углублении понимания физико-химических процессов, приводящих к формированию наноразмерных полупроводников и получении новой информации о природе явлений, протекающих при поглощении и испускании света полупроводниковыми нанокристаллами и содержащими их твердотельными материалами.

Литература

1. Banyai L. and Koch S.W. Semiconductor quantum dots. Singapore, 1993. 243 p.
2. Optics of Semiconductor Nanostructures. Berlin, 1993. 590 p.
3. Yoffe A.D. // *Adv. Phys.*, 1993. Vol. 42, N 3. P. 173.
4. Brus L. // *Appl. Phys.: A*. 1991. Vol. 53, N 4. P. 465.
5. Woggon U. Optical properties of semiconductor quantum dots. Berlin; Heidelberg, 1997. 252 p.
6. Woggon U., Gaponenko S.V. // *Phys. Status Solidi: B*. 1995. Vol. 189, N 2. P. 285.
7. Bawendi M.G., Steigerwald M., Brus L.E. // *Annu. Rev. Phys. Chem.* 1990. Vol. 41, N 4. P. 477.
8. Steigerwald M.L., Brus L.E. // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1989. Vol. 19, N 4. P. 471.
9. Wang Y. // *Accounts Chem. Res.* 1991. Vol. 24, N 2. P. 133.
10. Wang Y., Herron N. // *J. Phys. Chem.* 1991. Vol. 95, N 2. P. 525.
11. Henglein A. // *Chem. Rev.* 1989. Vol. 89, N 8. P. 1861.
12. Vogel R., Hoyer P., Weller H. // *J. Phys. Chem.* 1994. Vol. 98, N 12. P. 3183.
13. Weller H. // *Angew. Chem.* 1993. Bd. 105, N 1. S. 43.
14. Lewis L.N. // *Chem. Rev.* 1993. Vol. 93, N 8. P. 2693.
15. Kamat P.V. // *Progr. Inorg. Chem.* 1997. Vol. 44, N 1. P. 273.
16. Alivisatos A.P. // *J. Phys. Chem.* 1996. Vol. 100, N 31. P. 13226.
17. Gurin V.S., Artemyev M.V. // *J. Cryst. Growth*. 1994. Vol. 138, N 4. P. 993.
18. Artemyev M.V., Gaponenko S.V., Germanenko I.N., Kapitonov A.M. // *Chem. Phys. Lett.* 1995, Vol. 243, N 5. P. 450.
19. Artemyev M.V., Sperling V., Woggon U. // *J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 81, N 10. P. 6975.
20. Gindele F., Westphaling R., Woggon U. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 71, N 15. P. 2181.
21. Dabbousi B.O., Rodriguez-Viejo J., Mikulec F.V. et al. // *J. Phys. Chem.: B*. 1997. Vol. 101, N 46. P. 9463.
22. Artemyev M.V., Rakovich Yu.P., G.P.Yablonski // *J. Crystal Growth*. 1997. Vol. 171, N 4. P. 447.
23. Artemyev M.V., Gurin V.S., Yumashev K.V. et al. // *J. Appl. Phys.* 1996. Vol. 80, N 11. P. 7028.
24. Yumashev K.V., Malyarevich A.M., Prokoshin P.V. et al. // *Appl. Phys.: B*. 1997. Vol. 64, N 1. P. 73; Vol. 65, N 5. P. 545.
25. Гурин В.С., Свиридов В.В. // *Коллоид. ж.* 1995. Т. 57, N 3. С. 313.
26. Гурин В.С., Свиридов В.В., Ляхов А.С. и др. // *Ж. неорганич. химии*. 1996. Т. 41, N 1. С. 5.
27. Gurin V.S. // *Abstr. 5th Eur. Conf. on Solid State Chem.* Montpellier, 1995. P. 442.
28. Gurin V.S., Prokopenko V.B., Melnichenko I.M. et al. // *Abstr. 7th Int. Conf. on the Structure of Non-Crystalline materials.* Cagliari, 1997. P. 47.
29. Mikhailov V.P., Yumashev K.V., Gurin V.S., Artemyev M.V. // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures.* Minsk, 1995. P. 56.
30. Юмашев К.В., Малайевич А.М., Артемьев М.В., Гурин В.С. и др. // *Квантовая электроника*. 1997. Т. 24, N 8. С. 741.
31. Mikhailov V.P., Yumashev K.V., Prokoshin P.V. et al. // *Ultrafast Phenomena. IX.* Berlin, 1994. P. 325.
32. Mikhailov V.P., Malyarevich A.M., Yumashev K.V. et al. // *Abstracts of EQEC'96.* Hamburg, 1996. P. 162.