

Методика контроля протекания поверхностных процессов с участием адсорбированных металлических кластеров в люминесцирующих конденсированных средах

Андрей И. Кустов¹ aikustov@rambler.ru
Сергей А. Никель²

¹ Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67а, г. Воронеж, 394030, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Несмотря на огромное количество работ, посвященных изучению фотостимулированных процессов (ФСП) в кристаллах со смешанным типом связи, проблема разработки и совершенствования информационно-измерительных методов контроля физических параметров объектов размеров в несколько нанометров и выработки критериев оценки возможности применения таких методов на сегодня остается актуальной. С практической точки зрения актуальной является проблема разработки информационно-измерительных методов на базе кинетических моделей процессов, что позволяет предложить алгоритмы применения новых методов контроля процессов зарождения или модификации центров с участием ионов или атомов металла в кристаллах со смешанным типом связи, так как к ним относится широкий класс полупроводников. Описана проблема контроля параметров технологических процессов на ранних стадиях зарождения новой фазы на поверхности конденсированных сред. Проанализирована возможность применения метода фотостимулированной вспышки люминесценции (ФСВЛ) для люминесцирующих кристаллов с ионно-ковалентной связью. Приведены основные формулы позволяющие оценить изменение концентрации адсорбированных на поверхности кристаллов частиц металла. Рассмотрены зависимости параметров фотостимулированной вспышки люминесценции от концентрации обрабатываемых растворов, что приводит к образованию кластеров различной степени дисперсности. Приведена модель описания процесса образования кластеров из адсорбированных атомов металла. Оценка параметров центров локализации неравновесных носителей заряда показала, что в рамках предлагаемой модели становится возможно оценить размер неустойчивых адсорбированных металлических кластеров. Для образца CdS:Ag размер таких кластеров составил 5–7 атомов. Предлагается использовать корреляционно-регрессионную модель для описания параметров ФСВЛ в качестве инструмента оценки применимости метода фотостимулированной вспышки люминесценции для контроля поверхностных процессов на ионно-ковалентных кристаллах AgCl, ZnS, CdS. Наилучшее значение критерия применимости модели ФСВЛ были получены для кристалла AgCl ($R^2 \rightarrow 1$). Для кристаллов CdS предложенная методика контроля технологических процессов должна быть доработана по параметрам измерения ФСВЛ.

Ключевые слова: моделирование, нанотехнологии, поверхность, люминесценция, адсорбция, конденсированные среды, кластер, методы измерения

A technique for controlling the course of surface processes involving adsorbed metal clusters in luminescent condensed media

Andrey I. Kustov¹ aikustov@rambler.ru
Sergey A. Nikel²

¹ Voronezh Branch of the Russian Economic University. G.V. Plekhanova, Karl Marx str., 67A, Voronezh, 394030, Russia

² Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. Despite the huge amount of work devoted to the study of photostimulated processes (PSP) in crystals with a mixed type of communication, the problem of the development and improvement of information and measurement methods for monitoring the physical parameters of objects of several nanometers and the development of evaluation criteria for the use of such methods today remains relevant. From a practical point of view, relevant is the problem of developing information-measuring methods on the basis of kinetic models of the processes that allows us to offer algorithms for the application of new methods to control the processes of nucleation and modification of centers involving ions or metal atoms in crystals with a mixed type of communication, how it relates to a broad class of semiconductors. The problem of control of parameters of technological processes at early stages of new phase origin on the surface of condensed media is described. The possibility of applying the photostimulated luminescence flash (PSLF) method for luminescent crystals with ion-covalent bond is analyzed. The basic formulas allowing to estimate change of concentration of the metal particles adsorbed on a surface are resulted. The dependences of the photostimulated luminescence flash parameters on the concentration of processing solutions, which leads to the formation of clusters of varying degrees of dispersion, are considered. The model of description of process of formation of clusters from adsorbed atoms of metal is resulted. The estimation of the parameters of the centers of localization of non equilibrium charge carriers showed that within the framework of the proposed model it becomes possible to estimate the size of unstable adsorbed metal clusters. For the sample CDs: Ag, the size of such clusters was 5–7 atoms. It is proposed to use the correlation and regression model to describe the parameters of FSVL as a tool for assessing the applicability of the photostimulated luminescence flash method for monitoring surface processes on ion-covalent crystals of AgCl, ZnS, CDs. The best value of the criterion of applicability of the model FSVL was obtained for the crystal of AgCl ($R^2 \rightarrow 1$). For the crystals CDs the proposed method of control of technological processes must be developed according to the measurement parameters FSVL.

Keywords: modeling, nanotechnology, surface, luminescence, adsorption, condensed matter, cluster, measurement methods

Для цитирования

Кустов А.И., Никель С.А. Методика контроля протекания поверхностных процессов с участием адсорбированных металлических кластеров в люминесцирующих конденсированных средах // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 74–81. doi:10.20914/2310-1202-2018-3-74-81

For citation

Kustov A.I., Nikel S.A. A technique for controlling the course of surface processes involving adsorbed metal clusters in luminescent condensed media. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 3. pp. 74–81. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-3-74-81

Введение

При формировании свойств новых материалов особая роль отводится разработке методов контроля технологического процесса.

В настоящее время все большее распространение получают технологии, которые оперируют с объектами, размер которых составляет от единиц до десятков нанометров. Поэтому актуальным является разработка и совершенствование методов неразрушающего контроля технологических процессов с участием таких объектов.

В работах [1, 6, 10] было показано, что при воздействии на ионно-ковалентные кристаллы различной степени дисперсности и их твердые растворы: химическая обработка растворами, облучение актиничным излучением или прямая бомбардировка поверхности атомами и ионами металлов на их поверхности образуются малоатомные неустойчивые кластеры металла. Изменение физических свойства материалов удавалось описать в рамках модели образования на поверхности кристаллов малоатомных металлических кластеров. Согласно данным работ [2, 5, 9] адсорбция атомов или малоатомных металлических кластеров на поверхности кристаллов приводит к образованию в запрещенной зоне глубоких электронных уровней, которые играют роль электронных ловушек. Малоатомные металлические кластеры, адсорбированные на поверхности кристаллов со смешанным типом связи, являются неустойчивыми, пока не объединяются в структуры, близкие по своим свойствам к свойствам металлических частиц [4, 7].

Описанный в работе [3] метод фотостимулированной вспышки люминесценции (ФСВЛ) позволяет определять концентрации заполненных глубоких электронных ловушек в кристаллофосфорах. При этом сам метод ФСВЛ при подборе интенсивностей коротковолнового и длинноволнового излучений не разрушает как сами конденсированные среды, так и адсорбированные на их поверхности малоатомные кластеры [2, 8].

Основная часть

Несмотря на огромное количество работ, посвященных изучению фотостимулированных процессов (ФСП) в кристаллах со смешанным типом связи, проблема разработки и совершенствования информационно-измерительных методов контроля физических параметров объектов размеров в несколько нанометров и выработки критериев оценки возможности их применения

на сегодня остается актуальной. Фотостимулированные процессы играют огромную роль в полупроводниковых системах, проявляют себя в эффектах деградации, при разработке новых материалов и разработке контрольно-измерительных методов неразрушающего контроля.

Поскольку объекты малых размеров не проявляют себя в спектрах поглощения, электропроводности и т. д., ввиду малости концентраций при зарождении новой фазы, то для их изучения требуются подходы, позволяющие принять сигнал от объектов, размеры которых всего несколько нанометров не разрушив их, так как малоатомные кластеры неустойчивы [4].

С практической точки зрения интерес представляет разработка информационно-измерительных методов на базе кинетических моделей процессов, которые позволяют предложить алгоритмы применения новых методов контроля процессов зарождения или модификации центров с участием ионов или атомов металла Me_n в кристаллах со смешанным типом связи, так как к ним относится широкий класс полупроводников.

Поскольку кинетические уравнения требуют знания коэффициентов, описывающих интенсивность элементарных процессов, то для определения параметров систем кинетических уравнений используется подход, основанный на измерении интегральных параметров – сигналов, которые возможно уверенно зафиксировать на современном уровне развития экспериментальной физики.

Сам метод ФСВЛ заключается в том, что если в запрещенной зоне конденсированной среды имеются глубокие ловушки неравновесных зарядов, то концентрация таких ловушек может быть зафиксирована путем сканирования резонансным излучением запрещенной зоны кристаллов, как правило, инфракрасным излучением. Захватывая квант света, электрон попадает в зону проводимости и проявляет себя в спектре люминесценции.

Зонная диаграмма кристаллофосфора, имеющего локальные уровни (электронные ловушки), изображена на рисунке 1, где N_i – концентрация ловушек электронов типа i ; n_i – концентрация ловушек типа i захвативших электрон; δ_i и ω_i – вероятности захвата электрона на ловушку и ионизации ловушки соответственно; N – концентрация центров свечения; n – концентрация ионизованных центров свечения; β – вероятность рекомбинации свободного электрона с центром свечения.

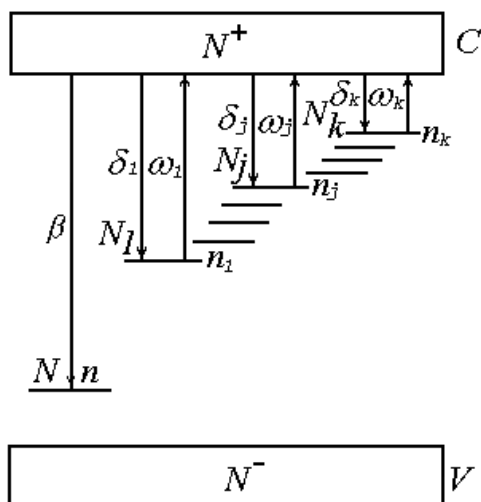


Рисунок 1. Зонная схема кристаллофосфора при наличии глубоких электронных ловушек после времени t_1 – возбуждение образца

Figure 1. Conditioning diagram crystallophosphorus in the presence of deep electron traps after the time t_1 – excitation of the sample

Свет стимулирующего излучения легко отсеять оптическими методами от основной полосы люминесценции, следовательно, отношение сигнала к шуму становится очень высоким. Именно это обстоятельство и позволяет фиксировать зарождение отдельных частиц, поскольку для регистрации применяется метод счета фотонов.

Основными параметрами ФСВЛ являются: S – полная высвеченная светосумма и K_k – коэффициент кинетики. S – пропорциональна концентрации ловушек электронов или дырок, а K_k – эффективному сечению поглощения длинноволнового излучения центрами локализации. Измеряя основные коэффициенты ФСВЛ по формулам 1, определяют концентрацию малоатомных металлических кластеров и их эффективное сечение поглощения ИК излучения.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sigma_i I n_{j0} \cdot \exp(-\sigma_j I t) \\
 S_0 &= I(0) = \sigma_j I n_{j0} \\
 S_\infty &= \int_0^\infty I(t) dt = n_{j0} \\
 K_k &= \frac{S_0}{S_\infty} = \sigma_j I \sim \sigma_j \text{ (при } I = \text{const)}
 \end{aligned} \quad (1)$$

где S_0 – амплитуда ФСВЛ, а S_∞ – полная запасенная светосумма, I – интенсивность люминесценции, n_j – концентрация уровней локализации неравновесных зарядов.

В качестве модельных образцов широкое распространение получили различные модификации кристалла AgCl обработанные в растворах

или подвергнутые физическому воздействию. Глубокие электронные ловушки, ответственные за вспышку люминесценции в галогенидах серебра имеют серебряную природу. При изучении влияния высоких доз УФ на галогениды серебра, независимо от природы исследуемых материалов: бромида серебра, бромидосеребряных эмульсий, хлорида серебра, при температуре жидкого азота, наблюдается уменьшение стационарной фотолюминесценции [4]. Данное явление получило название “усталости люминесценции” и характеризуется коэффициентом усталости K_y . Уменьшение интенсивности люминесценции обусловлено появлением канала безызлучательной рекомбинации, конкурирующего с центрами свечения или центрами внешнего тушения [1].

Показано, что основная роль в процессе уменьшения стационарной люминесценции принадлежит поверхности. При этом в хлориде серебра, например, под действием УФ излучения образуются малоатомные серебряные кластеры. Эксперименты с растворами окислителей серебра подтверждают эту точку зрения.

При исследовании процессов зарождения новой фазы конденсированных сред – кластеров на поверхности кристаллов с ионно-ковалентной связью для описания процесса образования металлических кластеров на поверхности кристалла можно использовать модель взаимного преобразования центров двух типов. В случае, если $x_0 \ll X$, где x_0 – начальная концентрация адатомов металла на поверхности кристалла, а X – концентрация мест на поверхности кристалла, на которых возможна адсорбция адатомов; при этом так же выполняется $y \ll Y$, где y – концентрация малоатомных металлических кластеров, а Y – концентрация реакционно-способных мест, на которых возможно образование кластера. Для определенности будем считать, что в начальный момент времени на поверхности кристалла находятся только адатомы, причем их концентрация x_0 , т. е. образование кластеров еще не началось. Тогда уравнение взаимного преобразования центров запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = A \cdot x - B \cdot y \\ \frac{dx}{dt} = B \cdot y - A \cdot x \\ x_0 - x = k \cdot y \end{cases} \quad (2)$$

Последнее уравнение системы (2) коэффициент k определяет среднее количество центров типа x в y , то есть из какого количества атомов состоит кластер. Начальные условия: $x = x_0$; $y = 0$; при $t = 0$.

Решение данной системы:

$$y = \frac{Ax_0}{Ak + B} (1 - \exp\{-[Ak + B] \cdot t\}) \quad (3)$$

$$x = x_0 - k \cdot \frac{Ax_0}{Ak + B} (1 - \exp\{-[Ak + B] \cdot t\}) \quad (4)$$

В стационарном случае, то есть $t \rightarrow \infty$ получаем:

$$y^\infty = \frac{Ax_0}{Ak + B} \quad (5)$$

$$x^\infty = x_0 - k \cdot \frac{Ax_0}{Ak + B} \quad (6)$$

Вероятности преобразования центров друг в друга можно представить в виде [7]:

$$A = A_0 \exp\left\{-\frac{E^A_{акт}}{k_B T}\right\}, \quad (7)$$

$$B = B_0 \exp\left\{-\frac{E^B_{акт}}{k_B T}\right\}$$

Поскольку частотные факторы A_0 и B_0 в первом приближении одного порядка, то при отличии энергий образования и распада центров какого либо типа при азотных температурах порядка 0,08 эВ, а при комнатных порядка 0,12 эВ можно считать, что $A \gg B$. Подобная ситуация, например, реализуется для малоатомных металлических кластеров в галогенидах серебра, при их облучении при температурах порядка 80К, поскольку в темноте за времена, превышающие времена образования малоатомных металлических кластеров на порядок, не наблюдается их распада.

В этом случае, $A \gg B$, формула дает:

$$y^\infty = \frac{x_0}{k} \quad (8)$$

Как известно, атомы металла и малоатомные металлические кластеры, адсорбированные на поверхности кристаллов, имеют целый набор энергетических уровней в запрещенной зоне кристалла, что позволяет их обнаружить и контролировать методом фотостимулированной вспышки люминесценции (ФСВЛ).

Измеряя S_y^∞ и S_x^0 , можно оценить размер образующихся центров по их отношению

$$\frac{S_x^0}{S_y^\infty} \quad (9).$$

Проведенное выше описание модели процесса образования малоатомных металлических кластеров показывает, что используя метод ФСВЛ при определенных экспериментальных условиях можно определить примерный размер образующихся металлических кластеров.

Методика проведения такого эксперимента должна быть следующая: необходимо использовать кристаллы имеющие малые концентрации адатомов. Сначала, измеряется полная высвеченная светосумма, величина пропорциональная концентрации электронных ловушек, в нашем случае адатомов металла. В последующем производится засветка кристалла, что приводит к образованию металлических кластеров. При достаточно длительных временах засветки практически все адатомы участвуют в образовании кластеров. Измерив теперь S^∞ получаем концентрацию центров типа у. Количество атомов в кластере определяется отношением светосумм измеренных до облучения и после облучения кристалла. Необходимо подчеркнуть, что светосуммы пропорциональные концентрации адатомов и кластеров следует отсчитывать от светосуммы измеряемой после очистки поверхности образца, поскольку в этом случае светосумма $S_{пов}$ будет определять концентрацию собственных кристаллических объемных и поверхностных ловушек электронов. Надо отметить, что поскольку функция $f(t) = x + y$ всегда будет выше значения y^∞ , то можно точно говорить лишь о том, что кластер содержит приблизительно (не менее) k атомов.

Экспериментальная установка для проведения температурных исследований и исследований кинетики образования глубоких электронных состояний подробно описана в [3].

При изменении концентрации обрабатываемых растворов наблюдается характерная зависимость, приведенная на рисунке 2. Аналогичная зависимость изменения полос при обработках ионно-содержащими растворами наблюдалась и для других кристаллов с ионно-ковалентным типом связи, при этом графики могут смещаться относительно диапазона концентраций обрабатываемых растворов.

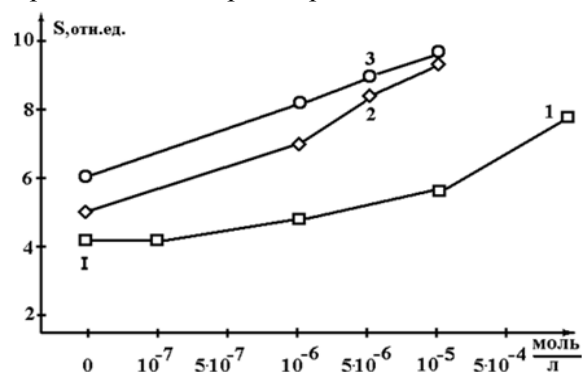


Рисунок 2. Зависимость полной высвеченной светосуммы от концентрации ионно-содержащего раствора. 1 – AgCl + AgNO₃, 2 – ZnS + CuCl₂, 3 – ZnS + ZnCl₂

Figure 2. Highlighted the complete dependence of the light sum of the concentration yodosoderzhazhego solution. 1 – AgCl + AgNO₃, 2 – ZnS + CuCl₂, 3 – ZnS + ZnCl₂

Обработка ионно-ковалентных кристаллов содержащими ионы растворами приводит к синхронному изменению полной высвеченной светосуммы, рисунок 3. Видно, что с увеличением концентрации обрабатываемого раствора, в определенных пределах, наблюдается увеличение полной высвеченной светосуммы. Из данных о концентрациях обрабатываемых растворов и значения S можно сделать вывод, что при малых концентрациях растворов содержащих ионы металлов наблюдается одинаковая тенденция увеличения количества адсорбированных кластеров Me_n , при их удалении, путем травления поверхности, происходит восстановление люминесцентных параметров кристаллов к исходным.

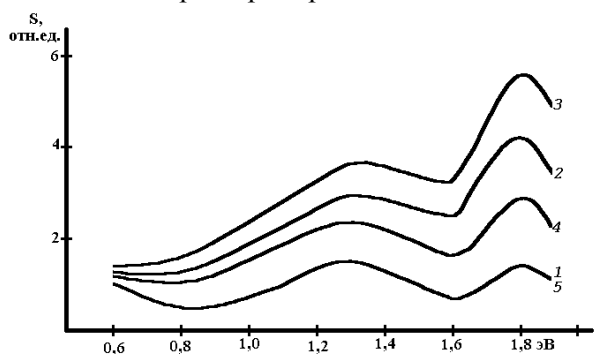


Рисунок 3. Зависимость полной высвеченной светосуммы от длины волны стимулирующего излучения для МК: 1 – CdS; 2 – CdS: Ag(10^{-6}); 3 – CdS: Ag(10^{-5}); 4 – CdS: Ag(10^{-4}); 5 – CdS: Ag(10^{-5} , 10^{-4}) обработанные в растворе $K_3Fe(CN)_6$

Figure 3. Dependence of the total illuminated light sum on the wavelength of the stimulating radiation for MK: 1-CdS; 2-CdS: Ag (10^{-6}); 3-CdS: Ag (10^{-5}); 4-CdS: Ag (10^{-4}); 5-CdS: Ag (10^{-5} , 10^{-4}) treated in a solution $K_3Fe(CN)_6$

При изучении спектра фотостимулированной вспышки люминесценции наблюдается взаимосвязь максимума спектра ФСВЛ с видом ионов металла в обрабатываемом растворе, то есть удается соотнести максимумы полосы люминесценции и виды обрабатываемых растворов [3], что позволяет иметь дополнительную возможность идентификации природы полосы люминесценции и наличия адсорбированных кластеров или структур, образованных с их участием.

Параметры ФСВЛ коррелируют между собой в рамках модели образования малоатомных кластеров, что согласуется с формулой (1), изменение концентрации центров локализации электронов и эффективного сечения поглощения ИК излучения K_k и S для модельных ионно-ковалентных кристаллов. Исследования кристаллов AgCl, CdS и ZnS показали, что наиболее высокая корреляция наблюдается у образцов с типом связи смещенной в сторону ионных кристаллов, например AgCl (см. рисунок 4). Для кристаллов с большей долей ковалентных связей синхронность изменения параметров ФСВЛ наблюдается не всегда.

До настоящего времени является открытым вопрос о применимости метода ФСВЛ к различным кристаллам с ионно-ковалентной природой связей. Предлагается использовать метод корреляционно – регрессионного анализа для оценки возможности применения метода ФСВЛ для контроля параметров поверхностных процессов в люминесцирующих конденсированных средах со смешанным типом связей.

Данные об изменении параметров ФСВЛ для модельного кристалла AgCl позволили предположить, что если выводы о возможности контролировать изменение размеров кластеров путем измерения параметров ФСВЛ верны, то должна наблюдаться линейная регрессия для параметров полной запасенной светосуммы – S_∞ и коэффициента кинетики ФСВЛ – K_k . Построив по данным, приведенным на рис. 4 зависимость коэффициента кинетики ФСВЛ $AgNO_3$ для AgCl удалось построить корреляционно-регрессионную модель для взаимосвязи коэффициента кинетики K_k и полной высвеченной светосуммы S , смотри рисунок 5. При этом коэффициент детерминации R^2 не меняется в зависимости от энергии возбуждения и равен 0,91. Уравнение регрессии имеет вид (10).

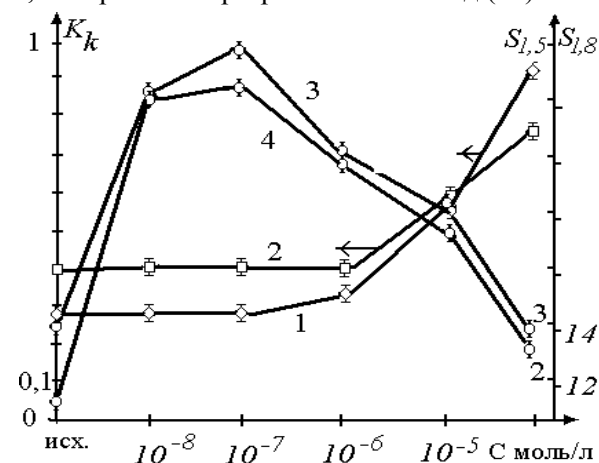


Рисунок 4. Зависимость K_k и S_∞ от C раствора $AgNO_3$ для модельного AgCl. 1, 3 – энергия стимулирующего кванта 1,5 эВ; 2, 4 – энергия стимулирующего кванта 1,8 эВ

Figure 4. The dependence of K_k and S_∞ on C solution $AgNO_3$ model to AgCl. 1, 3 – energy of the stimulating quantum 1.5 eV; 2, 4 – stimulating energy of a quantum of 1.8 eV

$$y = 1,07x + 1,13 \quad (10)$$

Построение данной корреляционно-регрессионной модели с R^2 близкой к 1 подтверждает возможность использование метода ФСВЛ для оценки процессов образования малоатомных кластеров в кристаллах различной степени дисперсности кристаллов AgCl и AgBr.

Подобная корреляция наблюдается и для других кристаллов со смешанным типом связи, но с меньшими коэффициентами детерминации: CdS: Ag $R^2 = 0,78$. Такое снижение значения R^2 указывает на то, что процессы, протекающие в кристаллах с решеткой $A^{II}B^{VI}$, имеют более сложную природу, чем в AgCl и конкурируют с процессами безызлучательной рекомбинации, что требует дополнительного изучения и совершенствования метода ФСВЛ или поиска оптимальных параметров ФСВЛ для данных сред.

Полученная регрессионная модель (рисунок 5) однозначно указывает на то, что с увеличением концентрации обрабатываемых растворов уменьшается количество кластеров, при этом растет их размер, рисунок 4. Данный вывод позволяет применить методику, предложенную в [3] для оценки размеров кластеров, обнаруживаемых методом ФСВЛ.

Критерий выраженной корреляции между K_k и S_∞ может служить условием применения модели кинетических уравнений для расчета размеров кластеров.

Обработка образцов МК CdS растворами, содержащими ионы Ag увеличивает полную высвеченную светосумму ФСВЛ в полосе 1,8 эВ при малых концентрациях, а при увеличении концентрации до 10^{-4} моль/л светосумма уменьшается, что говорит об образовании крупных кластеров, теряющих свойства нанобъектов.

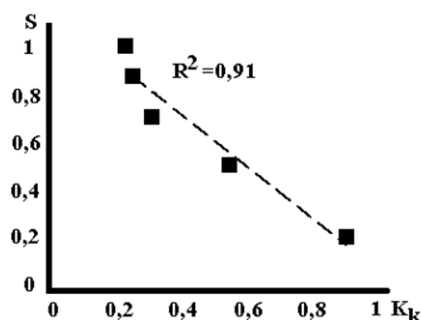


Рисунок 5. Нахождение корреляции между S и K_k для рисунка 3

Figure 5. To evaluate the correlation between S and K_k for figure 3

Измеряя S_y^∞ и S_x^0 методом ФСВЛ, можно оценить размер образующихся центров по их отношению S_x^0/S_y^∞ , т. е. размер кластеров.

Исходя из данных рисунка 3 видно, что для концентрации обрабатываемого раствора 10^{-6} моль/л кластеры и 10^{-5} моль/л светосумма S растет в 1,4 раза, при этом концентрация растет на порядок, что говорит об объединении адатомов

в отдельные малоатомные кластеры. k для такого процесса составляет не менее 5–7 атомов.

Алгоритм применения метода ФСВЛ, на базе которого возможна разработка оборудования для контроля технологических процессов с участием люминесцирующих конденсированных сред со смешанным типом связи, представлен на рисунке 6.

На первом этапе проводятся исследования процессов и определяются параметры ФСВЛ при соблюдении нормативных параметров технологического процесса. По данным исследования составляются градуировочные таблицы процессов. В дальнейшем при наличии в базе градуировочных таблиц, аналогичных условиям рабочего процесса, запускается процесс контроля технологии изготовления методом ФСВЛ. Периодически проводится проверка критериев применимости ФСВЛ по корреляционно-регрессионной модели.

В случае отсутствия градуировочных таблиц для контроля условий рабочего процесса следует провести дополнительные исследования (правая ветвь алгоритма на рисунке 6) и полученную градуировочную таблицу сохранить в базе данных.

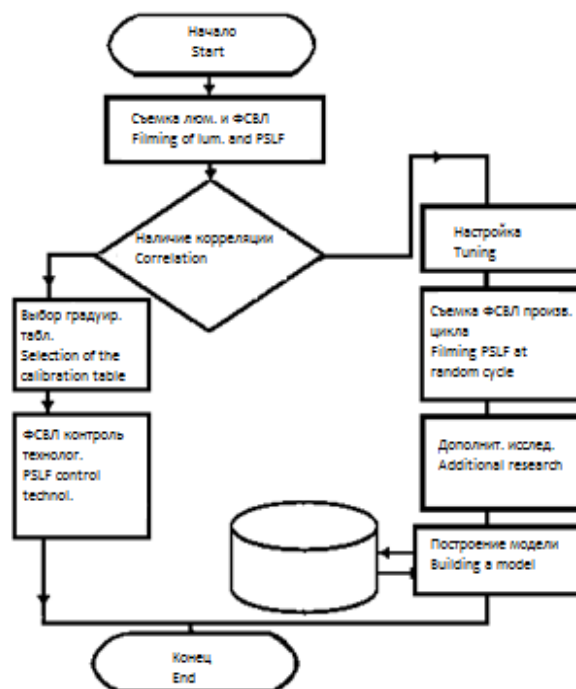


Рисунок 6. Алгоритм применения метода ФСВЛ для контроля технологического процесса с учетом применения критерия детерминации параметров K_k и S_∞ при получении градуировочной таблицы.

Figure 6. The algorithm of application of the method FSWL for process control, applying the criterion of determination of the parameters K_k and S_∞ upon receipt of the calibration table.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о возможности применения метода ФСВЛ для контроля концентрации центров локализации неравновесных носителей при условии существования корреляции между коэффициентом кинетики ФСВЛ и полной запасенной светосуммой.

Рассмотрение модельных кристаллов для апробации критериев применения метода ФСВЛ в рамках модели образования кластеров и с учетом рассмотрения возможности оценить размеры кластеров показало, что метод ФСВЛ хорошо работает для кристаллов AgCl – коэффициент детерминации при построении корреляционно-регрессионной модели близок к 1. Для кристаллов CdS и ZnS значения коэффициента детерминации позволяют говорить о возможности применения модели ФСВЛ

(значение $\approx 0,8$), но указывают на необходимость проведения дополнительных исследований в зависимости от структуры исследуемых объектов и химического состава.

Метод контроля концентрации и степени дисперсности адсорбированных кластеров металла, основанный на методе ФСВЛ, позволяет на базе регрессионного анализа проводить выбор условий для последующего контроля процессов образования малоатомных кластеров и формирования металлических кластеров заданных размеров на поверхности люминесцирующих конденсированных сред.

Данную модель можно расширить на более широкий класс конденсированных сред, имеющих уровни локализации неравновесных зарядов в запрещенной зоне и проявляющих люминесцентные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1 Латышев А.Н., Овчинников О.В., Ключев В.Г., Смирнов М.С. Фотостимулированная вспышка люминесценции: от научной фотографии к фотонике наноструктурированных материалов // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 4. С. 592–602.

2 Смирнов М.С., Стаселько Д.И., Овчинников О.В., Латышев А.Н. и др., Распад электронных возбуждений в коллоидных квантовых точках CdS и CdS/ZnS: спектральные и кинетические исследования // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 5. С. 737–746.

3 Кустов А.И., Скляр В.А., Макеева О.В. Информационно-измерительные методы контроля физических параметров поверхностных процессов в кристаллофосфорах // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 1(63). С. 67–72.

4 Ovchinnikov O.V., Smimov M.S., Latyshev A.N. Luminescence mechanisms of silver halide crystals at 77 K // Luminescence: the journal of biological and chemical luminescence. 2010. V. 25. № 3. P. 277.

5 Timoshenko Yu. K., Shunina V.A. On the localization of electron states near silver ion adsorbed on atomic-rough surface of AgCl nanocrystal // Surface Science. 2009. V. 603. № 16. P. 2564–2573.

6 Латышев А.Н., Овчинников О.В., Смирнов М.С., Стаселько Д.И. и др. Спектрально-контролируемая поатомная фотосборка кластеров серебра на поверхности ионно-ковалентных кристаллов // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109. № 5. С. 779–789.

7 Латышев А.Н., Ключев В.Г., Кустов А.И., Овчинников О.В. и др. Термическая десорбция атомов серебра с поверхности монокристаллов AgCl. // Поверхность. 2001. № 11. С. 76–81.

8 Латышев А.Н., Овчинников О.В., Минаков Д.А., Смирнов М.С. Спектры фотоионизации адсорбированных на поверхности монокристалла ZnS атомов серебра // Журнал прикладной спектроскопии. 2006. Т. 73. № 3. С. 335–338.

9 Тимошенко Ю.К., Шунина В.А. Визуализация локализованных электронных состояний нанокристалла AgCl с адсорбированным на атомно-шероховатой поверхности ионом серебра // Известия РАН. Серия Физика. 2008. Т. 72. № 9. С. 1311–1313.

10 Kluev V.G., Ovchinnikov O.V., Novikov P.V. et al. Up-conversion photoluminescence at Zn_{0.6}Cd_{0.4}S with adsorbed metal-organic complexes // Luminescence. The J. of Biol. & Chem. Lum. 2010. V.25. P.275 – 277.

REFERENCES

1 Latyshev A.N., Ovchinnikov O.V., Klyuev V.G., Smimov M.S. Photostimulated flash of luminescence: from scientific photography to photonics of nanostructured materials. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy] 2013. vol. 114. no. 4. pp. 592-602. (in Russian)

2 Smimov M.S., Staselko D.I., Ovchinnikov O.V., Latyshev A.N. et al. Decay of electronic excitations in colloidal quantum dots CdS and CdS / ZnS: spectral and kinetic studies *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy] 2013. vol. 115. no. 5. pp. 737-746. (in Russian)

3 Kustov A.I., Sklyarov V.A., Makeeva O.V. Information-measuring methods for controlling the physical parameters of surface processes in crystal phosphors. *Sistemy upravleniya* [Control Systems and Information Technology] 2016. no. 1 (63). pp. 67-72. (in Russian)

4 Ovchinnikov O.V., Smimov M.S., Latyshev A.N. Luminescence mechanisms of silver halide crystals at 77 K. *Luminescence: the journal of biological and chemical luminescence*. 2010. vol. 25. no. 3. pp. 277.

5 Timoshenko Yu. K., Shunina V.A. On the localization of electron states near silver ion adsorbed on atomic-rough surface of AgCl nanocrystal. *Surface Science*. 2009. vol. 603. no. 16. pp. 2564–2573.

6 Latyshev A.N., Ovchinnikov O.V., Smimov M.S., Staselko D.I. Spectral-controlled photocomposition of silver clusters on the surface of ion-covalent crystals. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy] 2010. vol. 109. no. 5. pp. 779-789. (in Russian)

7 Latyshev A.N., Klyuev V.G., Kustov A.I., Ovchinnikov O.V. et al. Thermal desorption of silver atoms from the surface of AgCl single crystals. *Poverkhnost' [Surface]* 2001. no. 11. pp. 76-81. (in Russian)

8 Latyshev A.N., Ovchinnikov O.V., Minakov D.A., Smimov M.S. Photoionization spectra of silver atoms adsorbed on the surface of a single crystal ZnS. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy] 2006. vol. 73. no. 3. pp. 335-338. (in Russian)

9 Timoshenko Yu.K., Shunina V.A. Visualization of the localized electronic states of an AgCl nanocrystal with an silver ion adsorbed on an atomic rough surface. *Izvestiya RAN* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series Physics] 2008. vol. 72. no. 9. pp. 1311-1313. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей И. Кустов к.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой, кафедра информационных технологий в экономике, Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67а, г. Воронеж, 394030, Россия, aikustov@rambler.ru

Сергей А. Никель к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 16.04.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 25.05.2018

10 Kluev V.G., Ovchinnikov O.V., Novikov P.V. et al. Up-conversion photoluminescence at Zn0.6Cd0.4S with adsorbed metal-organic complexes. *Luminescence The J. of Biol. & Chem. Lum.* 2010. vol. 25. pp. 275 – 277

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrey I. Kustov Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate professor, “Information Technologies in Economics” department, Voronezh Branch of the Russian Economic University. G.V. Plekhanova, Karl Marx str., 67A, Voronezh, 394030, Russia, aikustov@rambler.ru

Sergey A. Nikel Cand. Sci. (Engin.), associate professor, physics department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 4.16.2018

ACCEPTED 5.25.2018