

УДК 543.422.6:543.426

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФОСФОРОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ПУЧКАМИ

© 2020 г. Ван Яомин (Wang Yaoming)^a, Ю. И. Тюрин^a, Н. Н. Никитенков^a,
В. С. Сыпченко^a, А. Н. Никитенков^a, Чжан Ле (Zhang Le)^a

^a Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

*e-mail: jldxwym@mail.ru

Поступила в редакцию 22.10.2019 г.

После доработки 10.11.2019 г.

Принята к публикации 11.11.2019 г.

Описаны схема, конструкция, аппаратное обеспечение лабораторной установки для исследования взаимодействия пучков свободных атомов и молекул с поверхностью люминофоров. Приведены методики измерений эффективности электронных излучательных процессов на поверхности для изучения механизмов переноса энергии и изменения поверхности на основе спектрально-кинетических характеристик гетерогенной хемилюминесценции. Люминесцентные методы изучения гетерогенной рекомбинации атомов водорода на поверхности твердых тел позволяют явно выделить ударный (Ридила–Или) и диффузионный (Ленгмюра–Хиншелвуда) механизмы рекомбинации и оценить долю вкладов этих механизмов в общую скорость рекомбинации атомов в зависимости от плотности потока свободных атомов и температуры образца. Приведены примеры изучения спектров гетерогенной хемилюминесценции (г.х.л.) и фотолюминесценции при различных температурах люминофора $\text{AlN} : \text{Eu}^{3+}$, при возбуждении атомами водорода и ртутной лампой. При обработке кинетических кривых разгорания и затухания г.х.л. люминофора $\text{ZnS} : \text{Tm}^{3+}$ при включении и выключении атомно-молекулярного пучка $\text{H} + \text{H}_2$ приведен пример получения параметров атомно-молекулярных процессов на поверхности (адсорбции, ударной и диффузионной рекомбинации атомов и десорбции молекул водорода).

DOI: 10.31857/S0032816220020184

1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря тому, что гетерогенные хемилюминесцентные (г.х.л.) реакции обладают селективностью и высокой чувствительностью к типу поверхности и сорту возбуждающего газа [1, 2], использование оптических методов для изучения неравновесных систем “газ–твердое тело” открывает новые возможности в физике поверхности, химии, плазмохимии, технологии полупроводников и люминофоров, в решении экологических проблем [3]. Кроме того, в явлении г.х.л. принимает участие процесс высокоэнергетической электронной аккомодации твердым телом энергии химических реакций, протекающих на его поверхности, перенос этой энергии к центрам свечения твердого тела или локализация ее непосредственно в адсорбционном комплексе с последующей излучательной релаксацией. Таким образом, в г.х.л. заложены разнообразные возможности осуществления экспресс-методов анализа взаимодействия газов с твердыми телами [4, 5]. Новые возможности открывает явление г.х.л.

для изучения механизмов атомно-молекулярных взаимодействий на поверхности твердых тел.

Люминесцентные свойства кристаллов и люминофоров на их основе до сих пор являются предметом многочисленных исследований [6–8]. Г.х.л. кристаллов возбуждается за счет энергии физико-химических взаимодействий атомов непосредственно на поверхности твердых тел и доказывает существование излучательной электронной релаксации на поверхности и в приповерхностной области (40–70 Å) люминофоров, позволяет регистрировать ранние стадии изменения состава поверхности и приповерхностного слоя и влияния активных газов на эффективность люминесценции.

Разработка устройств и методов определения эффективности излучательной электронной релаксации в приповерхностной области на основе г.х.л. актуальна и для нанолюминофоров и квантовых точек при решении проблемы увеличения их квантового выхода и формирования спектрального состава [9–11]. Примеры установок и

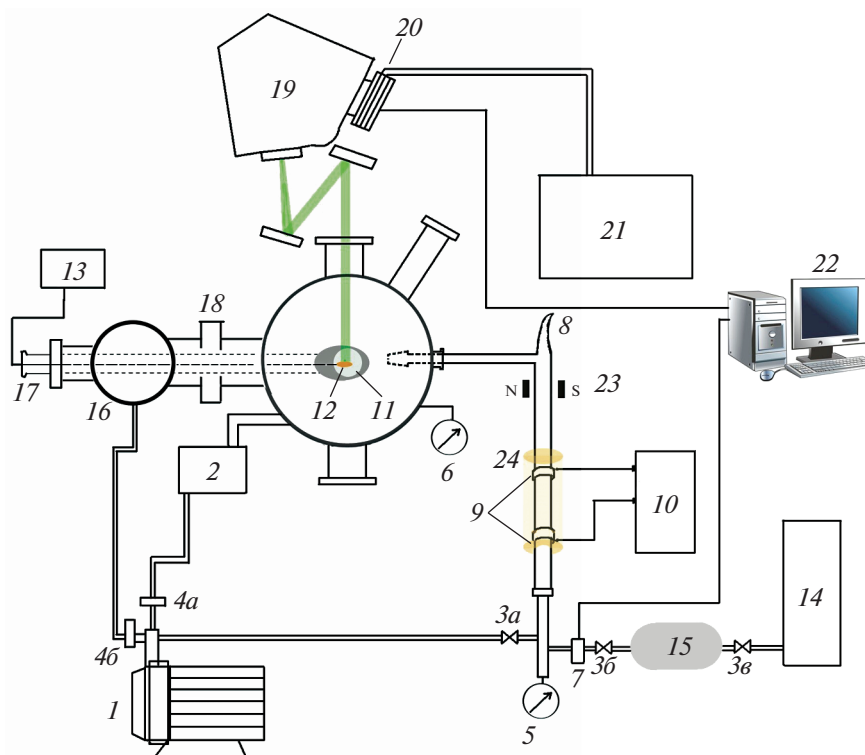


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования г.х.л. 1 – спиральный насос ISP-250С; 2 – турбомолекулярный насос (ТМН); 3а–3б – вакуумные вентили; 4а, 4б – клапаны; 5, 6 – вакуумметры (Micro-Ion Plus Vacuum Gauge 356002-YD-T фирмы Granville–Phillips); 7 – натекатели для напуска газа; 8 – кварцевая в.ч. разрядная трубка с рогом Вуда; 9 – электроды для генерации в.ч.-разряда в плазме; 10 – в.ч.-генератор; 11 – образец; 12 – микронагреватели; 13 – внутренний терморегулятор; 14 – генератор водорода ГВЧ-12М1; 15 – баллон для хранения газов; 16 – шлюз для замены образца; 17 – штанга для подачи образца; 18 – шиббер; 19 – спектрометр IHR320; 20 – п.з.с.-матрица ALTA U47; 21 – чиллер замкнутого типа SMC для охлаждения п.з.с.-матрицы ALTA U47; 22 – компьютер с программой управления системой регистрации интенсивности свечения и интерфейсом RS232; 23 – постоянные магниты; 24 – экранирующая сетка.

их применения для исследования излучательных процессов на поверхности конденсированных сред с использованием явления г.х.л. можно найти в работах [1, 4, 5].

Целью данной работы является представление новой установки для измерения спектрально-кинетических характеристик люминесценции кристаллофосфоров при разных условиях и способах возбуждения, в том числе при возбуждении пучком атомарного водорода, и представление некоторых полученных с ее помощью результатов и ее экспериментальных возможностей.

2. УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ

Установка разработана и изготовлена в отделении экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Томского политехнического университета.

В состав установки (рис. 1), кратко представленной в [12], входят:

– вакуумная часть;

– система подачи молекулярного водорода в область безэлектродного высокочастотного разряда;

– источник атомарного водорода высокочастотный генератор плазмы;

– блок нагрева и контроля температуры;

– комплекс регистрации спектрально-кинетических характеристик г.х.л. и фотолюминесценции (ф.л.);

– система калориметрической и люминесцентной регистрации атомов водорода.

Высоковакуумная система откачки состоит из форвакуумного спирального ISP-250С (1) и турбомолекулярного TMP-303М (2) насосов, вакуумных вентилях 3а–3б, клапанов 4а, 4б, вакуумметров 5 и 6 (Micro-ion plus 356002-YD-T, фирма Granville–Phillips) и вакуумпроводов. Предельное давление в системе $\sim 1.3 \cdot 10^{-4}$ Па; рабочее давление зависит от интенсивности напуска газа через натекатель DFD Z-750 (7) в кварцевую трубку 8 для генерации высокочастотного (в.ч.) разряда водородной плазмы. Напуск через вакуумный

вентиль 36 на баллоне и натекаль DFZ Z-750 позволяет поддерживать требуемое рабочее давление газа в интервале 10–0.1 Па по заданной программе.

На конце штанги 17 расположен микронагреватель 12 (YPS-MCH размером $20 \times 20 \times 1.7$ мм), помещенный в фольгу из нержавеющей стали 304 толщиной 0.1 мм. Микронагреватель обеспечивает нагрев люминофора в интервале от 20 до 300°C. На наклонной плоскости микронагревателя на инертной подложке устанавливается исследуемый образец 11. Температура поверхности микронагревателя контролируется термопарой.

Источник молекулярного водорода состоит из генератора водорода 14 (ГВЧ-12М1) – чистота газа 99.999%, баллона для хранения водорода 15 и натекаль для напуска газа 7. Водород получается электролизом дистиллированной воды на ионообменных мембранах в генераторе водорода.

При необходимости генератор водорода используется как первичный источник кислорода. Мембранный метод очистки водорода основан на использовании нанотехнологических полимерных мембран, селективно проницаемых по водороду. Водород хранится в баллоне 15 и подается в область в.ч.-разряда между электродами 9 по системе напуска газа. Интенсивность напуска газа задается компьютерной программой.

Атомарный водород, направляемый на поверхность исследуемого люминофора, генерируется с помощью емкостного безэлектродного высокочастотного разряда в молекулярном водороде. Для генерации плазмы используется: высокочастотный генератор 10 (УВЧ 30-2). Для предотвращения фотоподсветки на люминофор на разрядной трубке используется отсечка света рогом Вуда 8, отсечка ионов поступающих из области разряда выполняется постоянными магнитами 23. Используются неодимовые магниты двух типов: “большой” квадрат К-60-18-05-N (2 экз.) и неодимовый магнит “средний” квадрат К-10-10-05-N (2 экз.) [13]. Для дезактивации возбужденных молекул используется кобальтовая сетка (0.1 мм) [14].

Свет г.х.л. от образца выходит через окно камеры, фокусируется и направляется системой линз и зеркал на щель 19 спектрометра INR320. Спектр ф.л., г.х.л. записывается п.з.с.-матрицей (п.з.с. – приборы с зарядовой связью) CCD ALTA U47 (20) – Charge-Coupled Device Apogee Imaging Systems(AIS). CCD регистрирует спектры ф.л., г.х.л. и через интерфейс (RS232) сохраняет на жестком диске компьютера (22) с помощью программы KestrelSpec 5.43 Lite. Для охлаждения CCD используется чиллер замкнутого типа SMC (21). В системе регистрации для повышения чувствительности также может использоваться фотоэлектронный умножитель (ф.э.у.) VSE-FM16. В ф.э.у. использован модуль H11459-20 фирмы

НАМАМАТСУ [15]. Светочувствительность 500 мкА/лм. Минимальное время накопления 1 мкс. Информация о спектре г.х.л. записывается на компьютере с помощью программы COM Port Toolkit 4.0.

Последовательность действий изучения процессов взаимодействия атомно-молекулярного пучка водорода с поверхностью твердых тел на описанной установке включает следующие этапы:

- вакуумная ($\sim 6.67 \cdot 10^{-4}$ Па) очистка камеры;
- подача водорода в реактор при давлении $P \sim 10-0.1$ Па в зависимости от режима натекания;
- включение в.ч.-генератора, диссоциация молекул водорода и генерация атомов водорода в в.ч.-плазме низкого давления;
- отсечка ионной составляющей магнитами;
- подача эффузионного пучка $H + H_2$ на исследуемый образец;
- on-line-регистрация спектрально-кинетических характеристик ф.л. и г.х.л. люминофоров.

Схема регистрации спектрально-кинетических характеристик свечения образцов при возбуждении атомами водорода представлена на рис. 2а. Эффузионный пучок $H + H_2$ попадает на поверхность образцов и возбуждает свечение люминофоров, которое регистрируется детектором (ф.э.у. VSE-FM16, CCD-матрица ALTA U47). Схема измерения спектров и кинетических кривых свечения образцов при возбуждении ртутной лампой ДРТ 125-1 через фильтр УФС-06 (320–370 нм) представлена на рис 2б. Возбуждение ртутной лампой может вестись одновременно с экспозицией люминофора в пучке $H + H_2$. Температура образцов измеряется хромель-алюмелевой термопарой.

После фильтрации водородной плазмы в магнитном поле получаем атомно-молекулярный пучок водорода со степенью диссоциации $\chi \approx 10\%$. Атомы водорода по тefлоновому каналу с соплом ($d = 2$ мм) направляются на микрокристаллические образцы люминофора. Для регистрации изменения концентрации атомов водорода используется датчик из вольфрамовой нити накала галогенной лампы Navigator G 6.35 со вскрытой кварцевой колбой [13, 16]. Для регистрации изменения сопротивления вольфрамовой нити за счет рекомбинации на ней свободных атомов водорода, использовался мост Уинстона [17].

Плотность потока атомов водорода в эффузионном пучке равна [18]:

$$j, \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} = 1.11 \cdot 10^{22} \chi \frac{aP}{r^2 (MT)^{1/2}} \cos \theta,$$

где a – площадь отверстия в пренебрежимо тонкой стенке (0.03 см^2); P – давление газа ($0.03-1$ мм рт. ст.); M – молярная масса (1 г/моль); T – температура источника (305 K); θ – угол между r и нор-

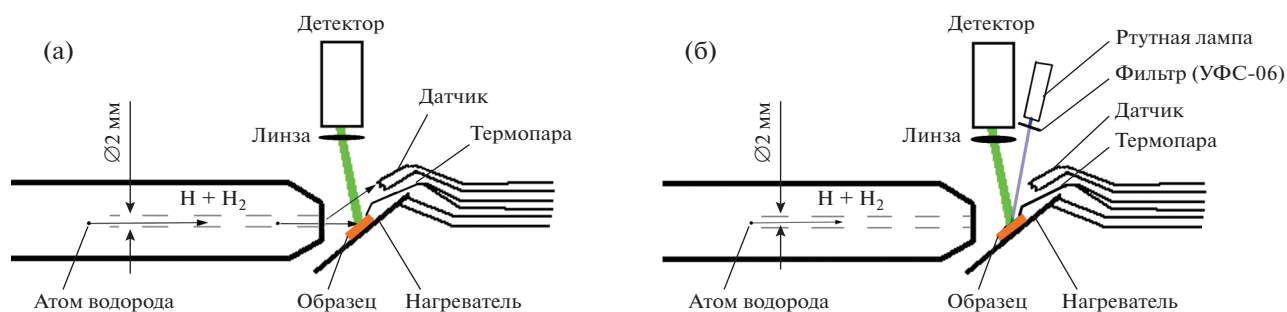


Рис. 2. Расположение образца, источника атомов, ртутной лампы, средств регистрации люминесценции и управления условиями эксперимента: а – возбуждение г.х.л., б – возбуждение ф.л.

мально к отверстию (0°); r – расстояние от источника (1 см). На основании приведенной формулы в условиях нашего эксперимента плотность потока атомов, попадающих на образец, равна $j = 8.8 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

3. АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ. ПРИМЕРЫ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Электронные процессы на поверхности играют важную роль в оптических полупроводниковых приборах, особенно приборах микроэлектроники. С этим связан большой интерес к изучению процессов рекомбинации и захвата неравновесных носителей в приповерхностной области пространственного заряда и к проблеме излучательных и безызлучательных переходов на поверхности. Исследование излучательной рекомбинации на поверхности методом г.х.л. обладает новыми возможностями, поскольку при г.х.л. первичное возбуждение и свечение локализовано в приповерхностной области (40–70 Å).

Зависимость интенсивности г.х.л. $I(t)$ от параметров люминесцирующей системы в момент времени t имеет вид [4]:

$$I(t) = B\sigma j(t)N(t), \quad (1)$$

где $I(t)$, квантов/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$) – интенсивность г.х.л.; σ – сечение реакции на поверхности, ответственной за возбуждение свечения; B – квантовый выход г.х.л. в такой реакции; $N(t)$ – концентрация центров, ответственных за возбуждение г.х.л. на поверхности; $j(t)$ – плотность потока атомов из газовой фазы.

Центрами свечения в г.х.л. выступают атомные структуры, включающие примесные ионы (Mn^{2+} , V^{3+} , Tm^{3+} и т.д.), и их комплексы с адсорбированными частицами, способные поглощать и высвечивать энергию экзотермических актов поверхностных взаимодействий свободных атомов и радикалов в диапазоне спектра от инфракрасного до ультрафиолетового излучения. Интенсивность г.х.л. пропорциональна концентрации примесных ионов на поверхности $N(t)$, и тем

самым г.х.л. дает способ люминесцентного анализа люминесцирующих примесей, входящих в состав кристаллофосфора.

Минимальные концентрации примесей, обнаруживаемые методом г.х.л., в пересчете на единицу объема твердого тела равны [4]:

$$n = N^{3/2} = [I(t)/B\sigma j(t)]^{2/3} \quad (2)$$

и составляют 10^9 см^{-3} при $I \approx 10^5$ квантов/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$); $B \approx 10^{-2}$; $\sigma = 10^{-17} \text{ см}^2$; $j \approx 10^{18}$ атомов/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). С помощью г.х.л. удается обнаружить примесь Tm^{3+} в ZnS , Eu^{3+} в AlN и других фосфорах на уровне $10^{-6} - 10^{-5}\%$.

Количественной характеристикой вероятности излучательной рекомбинации атомов на поверхности служит квантовый выход г.х.л.:

$$B = \frac{\eta B_i}{1 + \tau w}, \quad (3)$$

где τ – время излучательной релаксации центра свечения в отсутствие тушителя; w – вероятность безызлучательного переноса энергии в единицу времени с возбужденного центра, $B_i = (\tau \Gamma_i)^{-1}$, Γ_i – полная скорость релаксации возбужденного центра свечения.

Эффективность электронного возбуждения атомами H равна $\eta \approx 10^{-3}$. Пренебрегая потерями при безызлучательном переносе энергии к центрам свечения, получаем нижние оценки [4, 12, 19] вероятности излучательной релаксации центров свечения на поверхности B_i , приведенные в табл. 1.

В представляемой установке, в числе прочего, г.х.л. может изучаться в сравнении со спектрами ф.л. Для возбуждения спектров ф.л. использовалась ртутная лампа ДРТ 125-1. Спектр излучения этой лампы, отфильтрованный фильтром УФС-06, приведен на рис. 3.

На рис. 4 и 5 показаны измеренные спектры г.х.л. и ф.л., полученные при соответствующем возбуждении свечения фосфоров $\text{AlN} : \text{Eu}^{3+}$ атомами водорода (рис. 4) и ртутной лампой (рис. 5). Спектры регистрировались оптическим спектро-

Таблица 1. Вероятности излучательной релаксации центров свечения на поверхности

| Люминофор | ZnS : Mn | ZnS : Mn | ZnS : Ag | ZnS : Tm ³⁺ | CaO : Bi | MgO | AlN : Eu ³⁺ |
|----------------------------|----------|----------|----------|------------------------|----------|-----|------------------------|
| Вероятность $B_i, 10^{-2}$ | 10 | 50 | 2 | 60 | 1.5 | 3 | 3 |
| Температура, К | 340 | 300 | 300 | 306 | 360 | 300 | 300 |

метром IHR320, с ф.э.у. VSE-FM16 и п.з.с.-матрицей ALTA U47 CCD.

Как показано на рис. 4, после нагрева люминофора AlN : Eu³⁺ до 410 К (для сравнения температурного тушения люминесценции на поверхности (г.х.л.) и в объеме (ф.л.)) в спектрах г.х.л.-H+H₂ фосфора AlN : Eu³⁺ интенсивность полос 599.3 нм и 661.7 нм увеличилась. Полосы 539.4 нм и 704.0 нм перестали разрешаться. Полученная структура спектра г.х.л. связана с электронными переходами ⁵D₀ → ⁷F₁₋₄ в ионе Eu³⁺.

При возбуждении ртутной лампой фосфор AlN : Eu³⁺ преимущественно излучает в широкой полосе с максимумом 486.3 нм ⁵D₂ → ⁷F₁ и в узких полосах 630.8 нм ⁵D₀ → ⁷F₂ и 672.7 нм ⁵D₀ → ⁷F₃. С повышением температуры интенсивность ф.л. фосфора AlN : Eu³⁺ падает.

Спектры г.х.л.-H+H₂ приповерхностной области фосфора AlN : Eu³⁺ заметно отличаются от спектров ф.л. (см. рис. 4, 5).

Результаты спектральных измерений (рис. 4, 5) коррелируют с данными, полученными нами раньше, но значительно лучше структурированы [4, 19].

На рис. 6а, 6б приведены кривые разгорания и затухания люминесценции ZnS : Tm³⁺ в атомар-

ном водороде, полученные при изменении плотности потока атомов, “выключения” и “включения” атомов водорода.

Эксперименту рис. 6а (кривая 2) соответствует аппроксимирующая зависимость (t [с])

$$I(t) = 458e^{-0.0206t} - 358e^{-0.0096t} + 320. \quad (4)$$

Величины показателей экспонент и начальные скорости разгорания г.х.л. позволяют определить параметры взаимодействия водорода с поверхностью ZnS : Tm³⁺ – сечения адсорбции и ударной рекомбинации атомов водорода $\sigma_1 = 1.6 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ ($H + L \rightarrow HL$), $\sigma_2 = 3.2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ ($H + HL \rightarrow H_2L$), скорость десорбции молекул водорода $v_{-3} = 0.005 \text{ с}^{-1}$ ($H_2L \rightarrow H_2 + L$).

Люминесцентное свечение, возбуждаемое при взаимодействии атомов H с поверхностью, позволяет исследовать in situ рекомбинацию атомов водорода на поверхности ZnS : Tm по ударному Ридила–Или (РИ) и диффузионному Лэнгмюра–Хиншеллвуда (ЛХ) механизмам [4]:

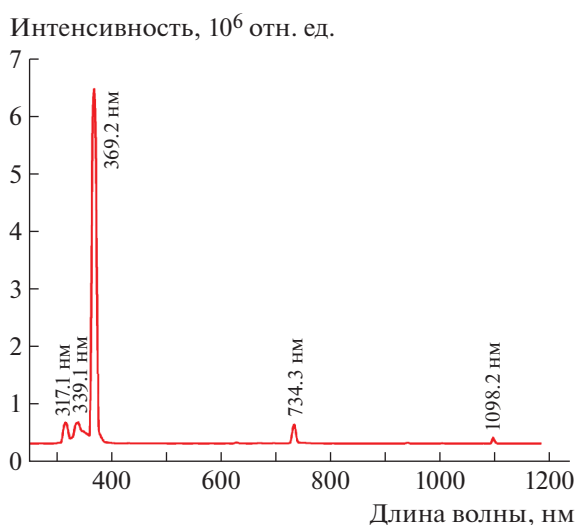
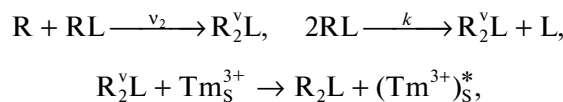


Рис. 3. Спектр излучения ртутной лампы ДРТ 125-1 с фильтром УФС-06. Давление в рабочей камере $5.47 \cdot 10^{-4}$ Па, температура 306 К.

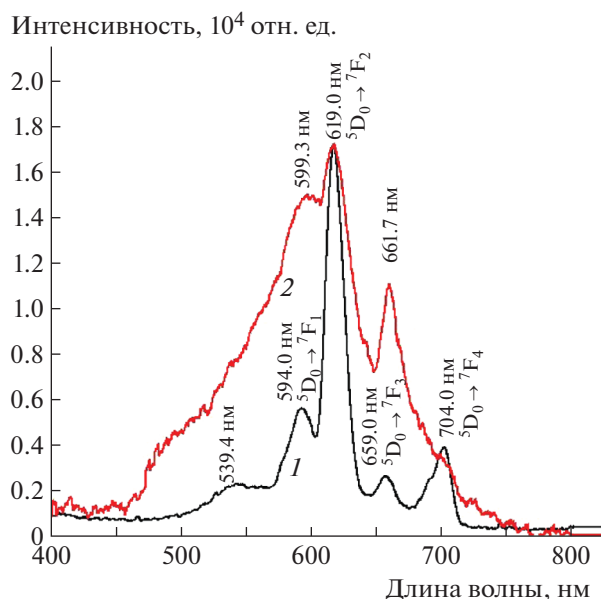


Рис. 4. Спектр люминесценции AlN : Eu³⁺ в атомарном водороде: 1 – 305 К, 2 – 410 К.

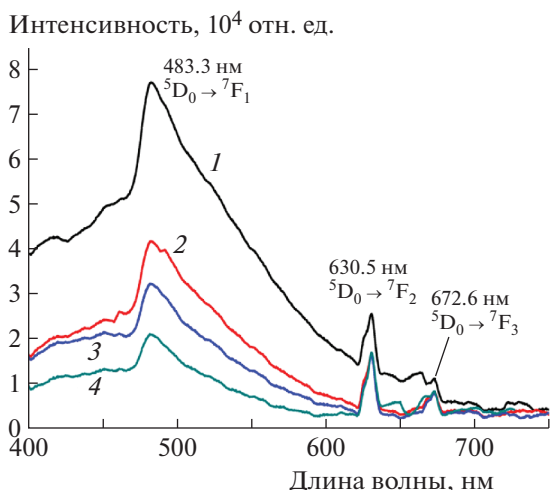
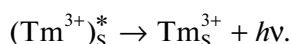


Рис. 5. Спектр фотолюминесценции AlN : Eu³⁺ при возбуждении ртутной лампой ДРТ 125-1 с фильтром УФС-06: 1 – 307 К, 2 – 400 К, 3 – 457 К, 4 – 493 К.



Интенсивность люминесценции I пропорциональна скорости рекомбинации атомов

$$I = Bv_2N_1 + B_1kN_1^2. \quad (5)$$

Наличие реакции ЛХ проявляется экспериментально (рис. 6б) в резком падении более чем на порядок интенсивности г.х.л. при “выключении” атомов, и далее интенсивность г.х.л. убывает по закону (рис. 6в)

$$I = \frac{I_0}{[1 + kN_1(0)t]^2}. \quad (6)$$

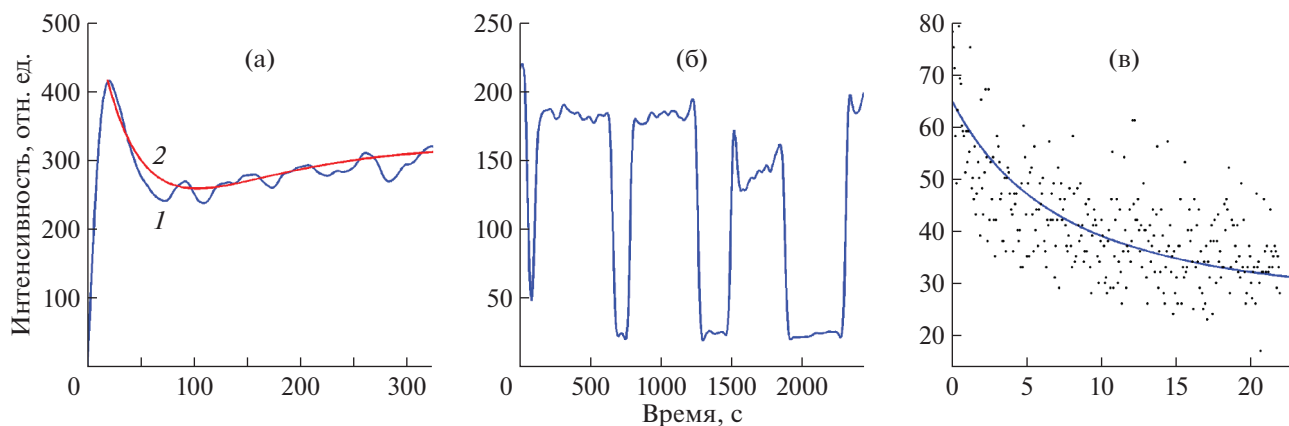


Рис. 6. Кинетические кривые люминесценции ZnS : Tm³⁺ ($P_{\text{H}+\text{H}_2} = 29.3$ Па, температура образца 305 К): а – при “включении” потока атомов водорода (I – эксперимент, 2 – моделирование (4)); б – при “выключении” и “включении” атомов водорода (“темновые” паузы – разной длительности); в – во время “темновой” паузы (точки – эксперимент, линия – аппроксимация (6)).

При времени экспозиции 3, 3.5 и 4 ч в атомарном водороде величина скорости реакции ЛХ $kN_1(0)$ составляет соответственно 0.07, 0.072 и 0.073 с⁻¹.

Установка позволяет ступенчато изменять мощность разряда и тем самым плотность потока атомов в пучке. Пропорциональность интенсивности люминесценции плотности потока возбуждающих атомов позволяет построить градуировочные графики $n = n(I)$ соответствия концентрации атомов и интенсивности г.х.л. на основе только люминесцентных измерений (рис. 7).

Представим, что при некоторой концентрации атомов n_0 (потоке j_0) известна интенсивность г.х.л. I_0 люминесцентного датчика. Изменим скачком концентрацию атомов на величину Δn (Δj), например, увеличив или уменьшив мощность в.ч.-разряда. Тогда согласно (1) интенсивность г.х.л. I в первый момент изменится на величину ΔI , определяемую величиной Δn (Δj), поскольку в момент скачка $N_1 = \text{const}$ в силу инерционности атомно-молекулярных процессов на поверхности. При этом будем иметь:

$$\Delta I/I_0 = \Delta j/j_0 = \Delta n/n_0. \quad (7)$$

Интенсивность г.х.л. I_1 , отвечающая новому стационарному состоянию после скачка, соответствует концентрации атомов $n_1 = n + \Delta n = n_0(1 + \Delta I/I_0)$, которая определяется по величине начальной концентрации n_0 и относительному приращению интенсивности г.х.л. ($\Delta I/I_0$) в момент скачка концентрации. Далее эта процедура может быть продолжена до требуемых концентраций атомов n . На рис. 7а представлены концентрационно-временные циклы, а на рис. 7б (кривая I) – градуировочный график $n = n(I)$, иллюстрирую-

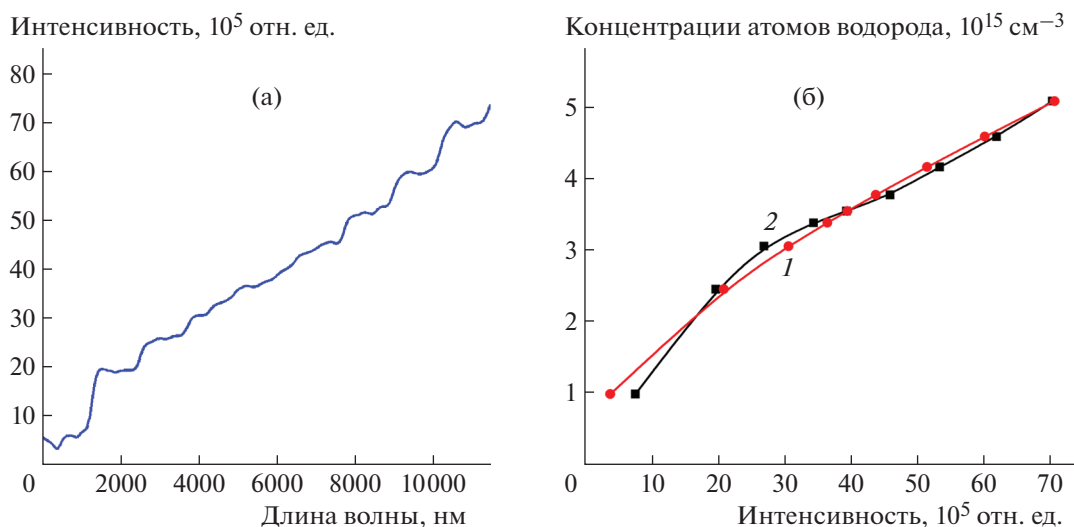


Рис. 7. Определение концентрации атомарных газов: **а** – изменение яркости г.х.л. фосфора ZnS : Mn²⁺ при ступенчатом изменении плотности потока атомов водорода (температура 295 К, давление 4.0 Па); **б** – градуировочный график соответствия между концентрацией атомов водорода и интенсивностью г.х.л. ZnS : Mn²⁺ в атомарном водороде (1 – люминесцентные г.х.л.-измерения, 2 – calorиметрические измерения).

ший данный метод. Проверка была осуществлена calorиметрическим методом (рис. 7б, кривая 2).

Современными ф.э.у. легко может быть зарегистрирована интенсивность свечения 10^4 – 10^5 квантов/см² · с. При квантовом выходе $B = 10^{-2}$ – 10^{-4} (фосфоры ZnS : Tm, ZnS : Mn), сечении рекомбинации $\sigma_2 = 10^{-17}$ с² и заполнении поверхности атомами $N_1 = 10^{13}$ см⁻² для регистрации доступны концентрации атомов 10^6 – 10^7 см⁻³.

Метод позволяет следить за очень быстрыми изменениями концентраций атомов в изучаемой системе.

Запаздывание между изменением концентрации атомов и люминесцентным откликом датчика ΔI определяется временем излучательной релаксации возбужденных центров свечения в люминесцентном датчике $\tau \approx 10^{-8}$ с. Столь высокие скоростные характеристики метода позволяют применять его для изучения газовых систем в ударных и взрывных процессах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана экспериментальная установка для люминесцентных методов изучения взаимодействия водорода с поверхностями твердых тел. Методы, основанные на явлении гетерогенной хемилюминесценции, дают чувствительный in situ инструмент изучения эффективности электронных излучательных процессов на поверхности, механизмов переноса энергии и процессов деградации поверхности.

Приведены краткие примеры сравнительного изучения спектров г.х.л. и ф.л. люминофора AlN : Eu³⁺ при возбуждении атомами водорода и ртутной лампой при различных температурах.

На примере обработки кинетические кривых разгорания и затухания г.х.л. люминофора ZnS : Tm³⁺ при включении и выключении атомно-молекулярного пучка H + H₂ получены параметры атомно-молекулярных процессов адсорбции, ударной, диффузионной рекомбинации атомов водорода на поверхности, десорбции молекул водорода и градуировочные зависимости: “концентрация атомов – интенсивность г.х.л.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dingkun Zhang, Ming Lin // J. Analysis and Testing. 2017. V. 1. P. 267. <https://doi.org/10.1007/s41664-017-0043-3>
2. Гранкин В.П., Волощук С.А., Гранкин Д.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 6. С. 92.
3. Михеева И.Л., Куринный В.К., Таякин В.Ю., Мазыра Л.Д. // Электроника и экология. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 2. С. 24.
4. Стыров В.В., Тюрин Ю.И. Неравновесные хемозффекты на поверхности твердых тел. М.: Энергоатомиздат, 2003.
5. Shigalugov S.H., Tyurin Y.I., Borovitskaya A.O., Dubrov D.V. // Periódico tchê Química. 2019. V. 16. № 316. P. 810.
6. Асеев В.А., Колобкова Е.В., Некрасова Я.А., Никонов Н.В., Рохмин А.С. // Materials Physics and Mechanics. 2013. V. 17. P. 135.

7. *Асатрян Г.Р., Бадиков В.В., Кулинкин А.Б., Феофилов С.П.* // *Физика твердого тела*. 2015. Т. 57. Вып. 1. С. 101.
8. *Поздняков Е.И.* // *Вестник Северо-Кавказного федерального ун-та*. 2013. № 5(38). С. 70.
9. *Зуев М.Г., Ильвес В.Г., Соковнин С.Ю., Васин А.А., Бакланова И.В.* // *Физика твердого тела*. 2019. Т. 61. Вып. 5. С. 1003.
<https://doi.org/10.21883/ftt.2019.05.47610.34f>
10. *Мамонова Д.В.* // Дис. ... канд. хим. наук. Санкт-Петербургский государственный университет, 2015. 136 с.
11. *Олейников В.А.* // *Биоорганическая химия*. 2011. Т. 37. № 2. С. 171.
12. *Tyurin Yu.I., Nikitenkov N.N., Sigfusson T.I., Hashhash A., Yaomin Van, Totmacheva N.D.* // *International J. Hydrogen Energy*. 2017. V. 42. P. 12448.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.058>
13. <http://новосибирск.магниты.рф/neodimovyy-magnit-bolshoy-kvadrat-k-60-18-05-n>
14. *Melin G.A., Madix R.J.* // *Trans. Faraday Soc.* 1971. V. 67. P. 2711.
<https://doi.org/10.1039/TF9716702711>
15. <https://pdf1.aldata-sheet.com/datasheet-pdf/view/575324/НАМАМАТСУ/H11459-20.html>
16. *Jungwook Choi, Jongbaeg Kim* // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2009. V. 136. Issue 1. P. 92.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.10.046>
17. *Tollefson E.L., Le Roy D.J.* // *J. Chem. Phys.* 1948. V. 16. № 11. P. 1055.
<https://doi.org/10.1063/1.1746724>
18. *Кудрявцев Н.Н., Мазяр О.А., Сухов А.М.* // *УФН*. 1993. Т. 163. № 6. С. 75.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0163.199306c.0075>
19. *Соколов В.А., Хоружий В.Д., Стыров В.В.* // *Спектроскопия кристаллов*. М.: Наука, 1975. С. 295–297.