

# Люминесценция жидкого азота после импульсного воздействия ультрафиолетового излучения

Д.Л. Кирко

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ*

*Каширское шоссе, 31, г. Москва, 115409, Россия*

E-mail: kirko@plasma.mephi.ru

Статья поступила в редакцию 31 июля 2014 г., после переработки 29 января 2015 г., опубликована онлайн 23 февраля 2015 г.

Исследуются оптические характеристики слабой длительной люминесценции жидкого азота после импульсного воздействия ультрафиолетового излучения. Люминесценция содержит объемное свечение жидкости и локализованные светящиеся области. Проведено изучение спектра люминесценции жидкого азота в видимой и ультрафиолетовой областях. Исследованы параметры ультрафиолетового излучения, влияющего на возбуждение свечения жидкого азота. Обсуждается возможная схема объемной люминесценции жидкого азота и рассматривается гипотеза образования локализованных светящихся областей.

Досліджуються оптичні характеристики слабкої тривалої люмінесценції рідкого азоту після імпульсної дії ультрафіолетового випромінювання. Люмінесценція містить об'ємне світіння рідини та локалізовані області, що світяться. Проведено вивчення спектру люмінесценції рідкого азоту у видимій і ультрафіолетовій областях. Досліджено параметри ультрафіолетового випромінювання, що впливають на збудження світіння рідкого азоту. Обговорюється можлива схема об'ємної люмінесценції рідкого азоту і розглядається гіпотеза утворення локалізованих областей, що світяться.

PACS: 78.55.Vq Люминесценция жидкостей;  
78.40.Dw Спектры поглощения жидкостей.

Ключевые слова: люминесценция жидкого азота, локализованные светящиеся области.

## 1. Введение

Жидкому азоту при воздействии импульсного ультрафиолетового излучения свойственна слабая длительная люминесценция всего объема жидкости в синей области видимого спектра [1,2]. В твердом и газообразном состояниях азота при низких температурах наблюдалась люминесценция под действием электронных пучков и электромагнитного излучения ультрафиолетового диапазона. Излучение молекулы азота содержит серии, расположенные в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра [3,4]. Наиболее известной серией люминесценции твердого азота, возникающей под воздействием электронного пучка, является серия Вегарда–Каплана в диапазоне 125–532 нм электромагнитного излучения при переходе между состояниями  $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$  молекулы азота [1,3,5]. Следует отметить, что люминесценция твердого азота ( $T \approx 4$  К) при возбуждении атомов азота наряду с молекулами азота представляет собой серии узких пиков (ширина  $\Delta\lambda \approx 0,2\text{--}0,3$  нм) в

диапазонах видимого излучения 467–473 и 584–590 нм [6]. Возбуждение в этих опытах осуществлялось с помощью электронного пучка с энергией около 10 кэВ. Исследовалась также люминесценция твердого азота ( $T \approx 20$  К) в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазоне под действием электронного пучка (энергия 300–500 эВ) [7]. Спектры люминесценции содержат серии узких пиков в области 100–200 нм ВУФ диапазона и возникают при переходах между состояниями  $a^1\Pi_g \rightarrow X^1\Sigma_g^+$  и  $a^1\Sigma_u^- \rightarrow X^1\Sigma_g^+$  молекулы азота.

Поглощение твердого азота ( $T \approx 20$  К) в диапазоне вакуумного ультрафиолета (118–145 нм) при переходе  $X^1\Sigma_g^+ \rightarrow a^1\Pi_g$  изучено в работе [8]. Спектр поглощения состоит из пиков шириной  $\Delta\lambda \approx 0,3\text{--}0,8$  нм. Для возбуждения азота использовался источник синхротронного излучения. Под действием вакуумного ультрафиолета в твердом азоте происходил фотолиз и образовывались радикалы  $N_3$ . Следует заметить, что образование радикалов  $N_3$  ранее наблюдалось в твердом азоте при температуре  $T \approx 12$  К под воздействием

пучка протонов с энергией  $E = 0,8$  МэВ [9]. Проводилось изучение поглощения полученных радикалов в инфракрасном диапазоне спектра. В то же время появление радикалов  $N_3$  может происходить при облучении твердого азота пучком электронов с энергией  $E = 5$  кэВ при температуре  $T \approx 10$  К [10]. При воздействии электронного пучка (энергия  $E = 500$  эВ) на твердый азот ( $T \approx 10$  К) [11] наряду с радикалами  $N_3$  обнаружены катионы  $N_3^+$ . Изучались спектры поглощения в ультрафиолетовом диапазоне 210–285 нм. Комплексное исследование процессов в твердом азоте и в неоновой матрице с добавкой азота под воздействием электронного пучка ( $E = 0,5$ – $2$  кэВ) в температурных диапазонах 5–40 и 5–15 К проведено в работе [12]. Обнаружено возникновение катионов  $N_2^+$  и, в результате последующей реакции димеризации, образование катионов  $N_4^+$ . В спектрах люминесценции твердого азота в диапазоне 100–600 нм регистрировались молекулярные серии Вегарда–Каплана, второй положительной и Огавы–Танаки–Уилкинсона–Малликена. Также изучалась люминесценция матрично изолированного азота (в области серии Вегарда–Каплана) при низкой и нормальной температурах (77, 300 К) и высоких давлениях (1–30 ГПа) [13]. Для возбуждения в этих экспериментах использовалось рентгеновское излучение. Спектры люминесценции располагались в ультрафиолетовом диапазоне 220–330 нм.

В жидком азоте наблюдается возникновение слабой люминесценции шарообразных областей длительно до 30–40 с при воздействии мощного капиллярного или дугового разряда [14–17]. В первых работах изучались основные факторы, влияющие на формирование локализованной люминесценции. Для исключения воздействия плазмы в экспериментах между разрядом и объемом жидкого азота располагались фильтры, пропускающие электромагнитное излучение. При этом наблюдалось образование объемной люминесценции и люминесценции локализованных областей. Ввиду этого целесообразно исследование спектральных характеристик люминесценции жидкого азота, а также закономерностей возбуждения люминесценции с помощью электромагнитного излучения.

## 2. Исследование спектра люминесценции жидкого азота

В качестве источника ультрафиолетового излучения использовался импульсный капиллярный разряд [18,19]. Разрядное устройство содержало пластину (оргстекло толщиной 3–4 мм) с капилляром (отверстие диаметром 4,0–4,5 мм). Источник питания представлял собой конденсаторную батарею с энергозапасом  $E = 50$ – $300$  Дж. Зарядное напряжение источника составляло  $U = 200$ – $300$  В, ток разряда  $I = 100$ – $150$  А, длительность импульса тока  $t \approx 6,1$  мс. Излучение данного

разряда содержит ряд спектральных линий в диапазоне 290–450 нм. Наиболее интенсивные линии атома алюминия Al I (309,2 нм), атома меди Cu I (324,7 нм), иона молекулы азота  $N_2^+$  (359 нм),  $N_2^+$  (381–393 нм), атома железа Fe I (296,6; 307,8; 322,5; 344; 355; 373,7; 385,2 нм). Меньшей интенсивностью обладают линии молекулярного кислорода  $O_2$  (402–429 нм) и атома водорода  $H_\gamma$  (434 нм). Длина факела в данных экспериментах имела минимальные размеры (3–4 см) ввиду большого диаметра капилляра. В экспериментах использовались сосуды из металлической фольги (алюминий, сталь, латунь, толщина 0,1–0,2 мм), которые располагались на керамической подставке. Сосуды имели форму параллелепипеда объемом (0,5–1,5)·10<sup>3</sup> см<sup>3</sup>. В среде жидкого азота ( $T \approx 77,4$  К) наблюдалось кипение и образование конвективных потоков. Средняя скорость испарения жидкости составляла  $dm/dt = 0,4$ – $0,6$  г/с.

Рассмотрим основные моменты регистрации локализованной люминесценции. Источник ультрафиолетового излучения располагается на расстоянии 5–6 см от поверхности жидкого азота. Благодаря малой длине факела разряд не касается поверхности жидкого азота. После включения капиллярного разряда и окончания его излучения фиксируется слабая люминесценция синего, голубого цвета всего объема жидкости, интенсивность которой быстро затухает в течение 1–2 с. Затем в объеме жидкого азота наблюдается слабая локализованная люминесценция, которая представляет собой шарообразные светящиеся области (диаметром 0,2–5 мм) и светящиеся области неправильной формы (размером 1–20 мм). Фотография локализованных светящихся областей приведена на рис. 1. Цвет свечений синий, голубой, реже светло-желтый, длительность излучения 10–40 с, количество светящихся областей 1–15 за одно включение разряда. Шарообразные светящиеся области способны свободно передвигаться по объему жидкости под действием потоков кипения. При охлаждении рабочего сосуда с помощью внешнего сосуда с жидким азотом потоки кипения в рабочем сосуде от-

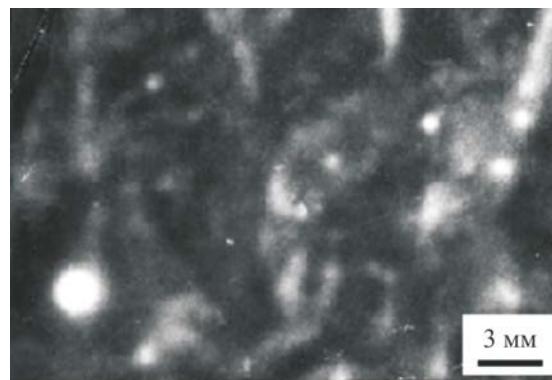


Рис. 1. Изображение светящихся областей в жидком азоте (время экспозиции  $t \approx 10$  мс).

существуют, и шарообразные светящиеся области располагаются неподвижно на дне данного сосуда. Ранее были установлены основные свойства шарообразных светящихся областей [14–16]. Существует аналог сил поверхностного натяжения, формирующих устойчивость поверхности светящейся области. Механическое воздействие на сгусток с помощью металлического стержня приводит к его погасанию. Отсутствует сильное влияние со стороны постоянных магнитного и электрического полей. Это свидетельствует о нейтральной или хорошо скомпенсированной внутренней структуре светящейся области. При движении светящейся области от дна сосуда к поверхности жидкого азота ее диаметр уменьшается и увеличивается интенсивность излучения.

Ввиду присутствия двух видов люминесценции (объемной и локальной) исследования объемной люминесценции проводились при минимальной скорости испарения жидкого азота  $dm/dt = (0,012 \pm 0,002)$  г/с при использовании внешнего охлаждения с помощью сосуда с жидким азотом. Наличие в объеме локальной люминесценции становилось минимальным, и ее вклад в характеристики объемной люминесценции предполагался незначительным.

Ранее исследования спектра объемной люминесценции жидкого азота были проведены с использованием монохроматора и фотоэлектронного умножителя [14].

При этом спектр получен сканированием по изучаемому диапазону с определенным шагом и является усредненным по большому количеству измерений. В настоящей работе для исследования спектрального состава люминесценции жидкого азота использовался спектрометр Ava Spec 2048 (рабочий диапазон 200–1000 нм, разрешение 0,3 нм). Применение ПЗС матрицы в данном приборе позволяет получить спектр за одно включение разряда. Временные характеристики излучения изучались с помощью монохроматора МУМ (рабочий диапазон 200–800 нм, разрешение 0,4 нм) и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-30. Калибровка спектральной аппаратуры проводилась во всем рабочем диапазоне с помощью эталонной лампы СИРШ8,5–200. Спектр объемной люминесценции жидкого азота, полученный с помощью спектрометра, приведен на рис. 2(а). Спектр непрерывный и расположен в диапазоне 380–560 нм. Погрешности измеряемых величин:  $\Delta I = 7$  Вт/м,  $\Delta \lambda = 0,3$  нм. Форма спектра асимметричная с максимумом на длине волны  $\lambda_m = (431 \pm 1)$  нм. Временная зависимость интенсивности объемного излучения (рис. 2(б)) на длине волны максимума спектра экспоненциально затухающая и может быть представлена в виде  $I = I_1 \exp(-t/\tau_1) + I_2 \exp(-t/\tau_2)$ ,  $\tau_1 = 0,9$  с,  $\tau_2 = 6,1$  с,  $I_1 = 108,4$  Вт/м,  $I_2 = 13,5$  Вт/м. По спектру рассчитана интегральная энергия объемной люминесценции, которая составила  $E = (23 \pm 2)$  мкДж.

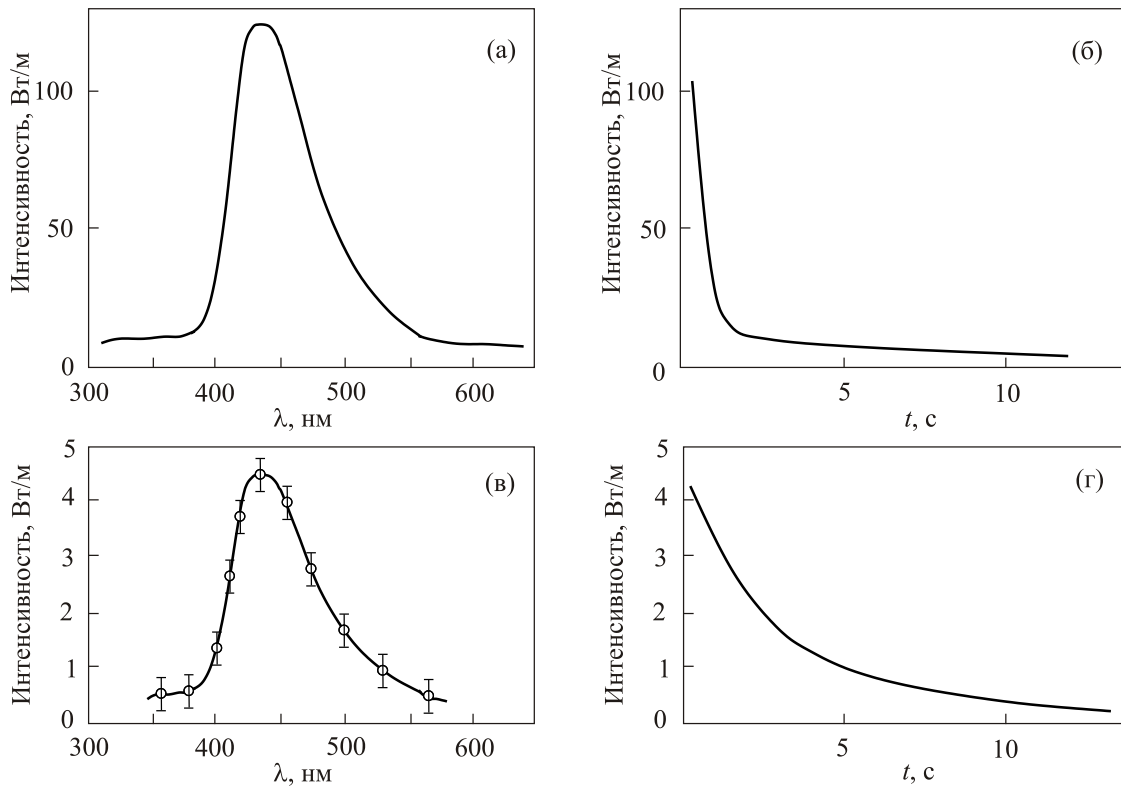


Рис. 2. Спектр люминесценции жидкого азота: (а) спектр объемной люминесценции, (б) временная зависимость интенсивности объемной люминесценции (длина волны  $\lambda_m \approx 431$  нм), (в) спектр локальной люминесценции, (г) временная зависимость интенсивности локальной люминесценции (длина волны  $\lambda_m \approx 431$  нм).

Для исследования спектра люминесценции шарообразных областей, при внешнем охлаждении сосуда, выделялась область с неподвижными светящимися сгустками на дне сосуда. С помощью объектива излучение светящихся областей фокусировалось на входное окно фотоэлектронного умножителя, перед которым устанавливался интерференционный светофильтр. Использовался набор одиннадцати светофильтров в видимом диапазоне спектра. На рис. 2(в) представлен спектр локальной люминесценции жидкого азота. Спектр имеет максимум на длине волны  $\lambda_m = (431 \pm 2)$  нм. Полученные значения интенсивности излучения шарообразных светящихся областей находятся вблизи кривой спектра объемной люминесценции с учетом погрешностей и нормировки максимальных значений данных двух зависимостей на одну и ту же величину. Временная зависимость интенсивности шарообразного свечения (рис. 2(г)) на длине волны  $\lambda_m \approx 431$  нм имеет вид  $I = I_0 \exp(-t/\tau)$ ,  $\tau = 3,3$  с,  $I_0 = 4,5$  Вт/м. Рассчитанная по спектру интегральная энергия люминесценции шарообразных областей равна  $E = (1,5 \pm 0,2)$  мкДж. При всех расчетах сделано предположение об изотропности излучения шарообразных светящихся областей во всем телесном угле  $4\pi$ .

Для экспериментов использовался технический жидкий азот с содержанием в качестве примесей жидкого кислорода около 1% и водяных паров около 0,01%. Опыты проводились вскоре после получения азота, поэтому количество примесей, появившихся в сосуде Дьюара в результате намораживания из атмосферы, предполагалось минимальным. Характерные спектры люминесценции водяного льда при температуре  $T \approx 77,4$  К [20,21] расположены в синей области видимого диапазона и имеют форму, отличную от полученного спектра люминесценции жидкого азота (рис. 2). Для молекулярного кислорода в конденсированном состоянии при температуре жидкого азота ( $T \approx 77,4$  К) приводятся данные люминесценции при возбуждении с помощью неодимового лазера ( $\lambda = 1064$  нм) [22]. Спектр люминесценции кислорода содержит пики шириной около 20 нм на длинах волн 635, 704 и 765 нм. Ввиду этого можно допустить появление искажений, вызванных наличием молекулярного кислорода. В настоящей работе влияние кислорода на спектр люминесценции жидкого азота предполагалось минимальным.

Для обеспечения воспроизводимости результатов экспериментов по исследованию люминесценции жидкого азота использованы следующие характеристики элементов установки. Капиллярный разряд как источник электромагнитного излучения обладает достаточно стабильными параметрами. Разброс энергии излучения от выстрела к выстрелу составляет около 6%. Используемые сосуды для жидкого азота охлаждались для обеспечения стабильной скорости испарения жидкого азота.

### 3. Изучение оптических характеристик жидкого азота

Исследование коэффициента пропускания жидкого азота в диапазоне 300–600 нм проводилось с помощью установки, состоящей из монохроматора МУМ, калибровочной лампы СИРШ8,5–200 и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-30. Рабочий объем жидкого азота охлаждался с помощью внешнего сосуда с жидким азотом для исключения потоков кипения. Скорость испарения жидкого азота была минимальна:  $dm/dt = (0,012 \pm 0,002)$  г/с. С помощью монохроматора выделялось излучение (спектральный диапазон  $\Delta\lambda \approx 0,5$  нм) и направлялось на зеркало, установленное в объеме жидкости, затем после отражения излучение регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя. Зависимость коэффициента пропускания жидкого азота от длины волны приведена на рис. 3. Погрешности величин в эксперименте составили: для коэффициента пропускания  $\Delta k = 0,03$ , для длины волны  $\Delta\lambda = 0,5$  нм. Согласно данному графику, максимальное поглощение жидкого азота, используемого в эксперименте, присутствует в области 300–360 нм.

Для определения диапазона ультрафиолетового излучения капиллярного разряда, вызывающего возникновение объемной люминесценции в жидком азоте, использовался набор десяти интерференционных светофильтров, выделяющих определенный диапазон излучения капиллярного разряда. С помощью подбора спектральных линий и ослабителей получена приблизительно одинаковая энергия излучения в каждом из выбранных диапазонов. С помощью фотоэлектронного умножителя регистрировалась интегральная объемная люминесценция жидкого азота. В эксперименте определялась энергия объемной люминесценции в зависимости от длины волны возбуждающего излучения (рис. 4). Установлено, что на возбуждение свечения в жидком азоте оказывает влияние область  $\Delta\lambda = 310$ –390 нм излучения разряда при максимуме зависимости на длине волны  $\lambda_m \approx 365$  нм. Возбуждение люминесценции — пороговый процесс, и минимальная необходимая энергия возбуждающего ультрафиолетового

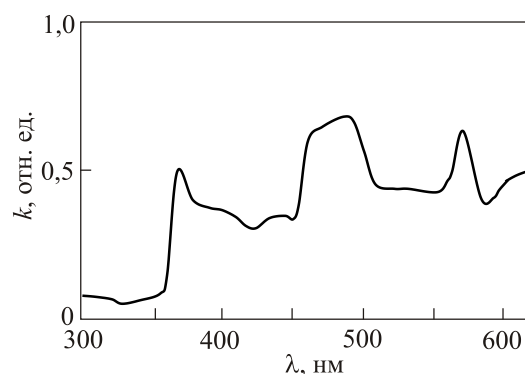


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания жидкого азота от длины волны.

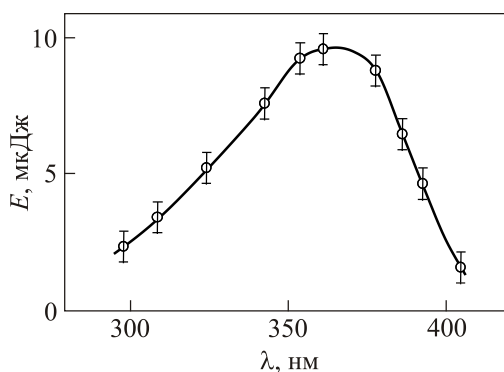


Рис. 4. Энергия объемной люминесценции жидкого азота в зависимости от длины волны возбуждающего излучения.

излучения составляет  $E = (0,12 \pm 0,01)$  мДж.

Пороговый характер возбуждения люминесценции, по-видимому, можно связать с минимальной плотностью энергии электромагнитного излучения. При использовании сосуда объемом  $1,5 \cdot 10^3 \text{ см}^3$  минимальная плотность энергии возбуждающего ультрафиолетового излучения составит  $E/V = (0,080 \pm 0,007)$  мкДж/см<sup>3</sup>, что можно сопоставить с количеством возбужденных молекул в среде жидкого азота при поглощении ультрафиолетовых квантов.

Использование малой длины факела капиллярного разряда минимизирует прямое воздействие плазмы на жидкий азот и участие ее в процессе возбуждения люминесценции. При применении светофильтров на жидкий азот воздействует только электромагнитное излучение. Из капиллярного разряда может направляться поток возбужденных атомов, ионов и молекул, которые могут достигать поверхности жидкого азота. В излучении факела было зарегистрировано излучение иона молекулы азота:  $N_2^+$  359 нм,  $N_2^+$  381–393 нм. Вследствие этого на поверхности жидкого азота возможны процессы с учетом частиц, вылетающих из факела капиллярного разряда. Ввиду малости данных потоков в экспериментах их влиянием можно пренебречь.

#### 4. Обсуждение полученных результатов

Рассмотрим возможную интерпретацию возникновения объемной люминесценции жидкого азота. Ранее были представлены эксперименты, в которых возбуждались различные молекулярные серии азота, находящегося в твердом состоянии при низких температурах [6–8,12]. Достаточно известной является серия Вегарда–Каплана при переходе  $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ , расположенная в области 125–532 нм электромагнитного спектра [3–5]. В данной серии излучение в видимом диапазоне возникает при переходе молекулы из низших колебательных состояний электронного состояния  $A^3\Sigma_u^+$  в высоковозбужденные колебательные состояния основного электронного состояния  $X^1\Sigma_g^+$  [3].

Можно предположить возможность возбуждения молекулы из низших колебательных состояний  $X^1\Sigma_g^+$  в высоковозбужденные. Для времени жизни состояния  $A^3\Sigma_u^+$  ( $E \approx 6,2$  эВ) в твердом и газообразном азоте при низких температурах приводятся значения  $\tau = 0,4\text{--}3,3$  с [3]. В газовых разрядах в присутствии азота изучены свойства метастабильного электронного состояния  $A^3\Sigma_u^+$  с временем жизни  $\tau = 1,3\text{--}2,6$  с [23].

В работе [24] изучена ионизация молекулярного азота и образование ионов  $N_2^+$  и  $N_4^+$  при атмосферном давлении с помощью импульсов лазера (иттрий-алюминиевый гранат) с излучением в диапазоне 275–290 нм. Использовался метод резонансно усиленной многофотонной ионизации (REMPI). Переход из основного состояния молекулы азота  $X^1\Sigma_g^+$  в состояние иона  $N_2^+$  происходит через промежуточные электронные возбужденные состояния молекулы азота  $a^1\Pi_g$  и  $b^1\Pi_u$ . При этом переход осуществляется под действием четырех фотонов лазерного излучения. Следует отметить, что в газах известна ступенчатая фотоионизация, которая происходит при воздействии фотонов на атомы в возбужденном состоянии [23,25]. Переход в возбужденное состояние осуществляется под действием фотонов в один или несколько последовательных этапов. Энергия каждого из поглощенных фотонов при этом меньше энергии ионизации атома. Близкие процессы с участием двух фотонов описаны для возбуждения фотолюминесценции твердых тел и жидкостей [21]. Люминесценции жидкостей при нормальной температуре свойственны непрерывные спектры [20,21].

При люминесценции жидкого азота регистрируется достаточно широкий непрерывный спектр. Согласно экспериментальным результатам, возбуждение люминесценции жидкого азота возникает под действием ультрафиолетовых фотонов с энергиями в диапазоне 3,2–4,0 эВ. Излучение люминесценции содержит фотоны видимого диапазона с энергиями в области 2,2–3,3 эВ. Предположим, что возможный вариант схемы люминесценции может включать электронное состояние молекулы азота  $A^3\Sigma_u^+$  ( $E \approx 6,2$  эВ), которое является метастабильным ( $\tau \sim 2$  с), что может объяснить длительное свечение жидкого азота. Переход молекулы в данное состояние может происходить под действием двух фотонов возбуждения. Возможный спектр люминесценции будет содержать серию линий в видимом диапазоне. Для появления непрерывного спектра люминесценции можно предположить наличие уширения линий данной серии. Однако надежная идентификация полосы люминесценции жидкого азота и схема заселения излучающего состояния требуют проведения дополнительных исследований.

Представим возможную гипотезу образования шарообразных областей люминесценции в жидком азоте. Расчеты энергии электромагнитного излучения, запасенной в шарообразных сгустках, дают значения

$E \approx 1,5$  мкДж, что на порядок меньше энергии объемного свечения. Качественные измерения спектра шарообразного свечения показывают его близость к спектру объемного свечения. Поэтому можно сделать предположение о том, что в случае объемного и шарообразного свечений работает одинаковая схема люминесценции. Интенсивность свечения шарообразных областей значительно превышает фон объемного излучения. Это свидетельствует о большой концентрации возбужденных частиц в области шарообразного сгустка. Перемещению сгустка по объему жидкости при этом будет соответствовать перемещение области повышенной концентрации возбужденных частиц. В экспериментах присутствует неоднородность освещения объема ультрафиолетовым излучением. Это может привести к появлению локальных областей, имеющих большую концентрацию возбужденных частиц относительно среднего значения в объеме жидкого азота. Данные локальные области неправильной формы могут иметь тенденцию к сжатию и уменьшению поверхности. При этом форма шара обладает наименьшей поверхностью, является энергетически более выгодной и приводит к меньшим потерям на излучение.

В ходе исследования определены основные оптические характеристики слабой длительной люминесценции жидкого азота, возникающей после облучения ультрафиолетовым излучением. Спектр люминесценции расположен в видимом диапазоне электромагнитного излучения с максимумом в синей области ( $\lambda_m \approx 431$  нм).

1. Г. Минков, *Замороженные свободные радикалы*, Изд-во иностр. лит., Москва (1962) [G.J. Minkoff, *Frozen Free Radicals*, Interscience Publishers Inc, New York (1960)].
2. J. Dewar, *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain* **14**, 665 (1896).
3. A. Lofthus and P.H. Krupenie, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **6**, 113 (1977).
4. Б.М. Смирнов, А.С. Яценко, *УФН* **166**, 225 (1996).
5. L. Vegard, *Nature* **113**, 716 (1924).
6. O. Oehler, D.A. Smith, and K. Dressler, *J. Chem. Phys.* **66**, 2097 (1977).
7. Ya. Fugol, Yu.B. Poltoratskii, and E.V. Savchenko, *JETP Lett.* **24**, 1 (1976).
8. Yu.-J. Wu, C.Y.R. Wu, S.-L. Chou, M.-Y. Lin, H.-C. Lu, J.-I. Lo, and B.-M. Cheng, *Astrophys. J.* **746**, 175 (2012).
9. R.L. Hudson and M.H. Moore, *Astrophys. J.* **568**, 1095 (2002).
10. C.S. Jamieson and R.I. Kaiser, *Chem. Phys. Lett.* **440**, 98 (2007).
11. Yu.-J. Wu, H.-F. Chen, S.-J. Chuang, and T.P. Huang, *Astrophys. J.* **768**, 83 (2013).
12. E.V. Savchenko, I.V. Khyzhniy, S.A. Uytunov, A.P. Barabashov, G.B. Gumenchuk, M.K. Beyer, A.N. Ponomaryov, and V.E. Bondybey, *J. Phys. Chem. A*, <http://dx.doi.org/10.1021/jp5087575>.
13. M. Semling, M. Jordan, K. Syassen, H.J. Jodl, and G.F. Signorini, *J. Chem. Phys.* **106**, 1336 (1997).
14. Д.Л. Кирко, А.С. Савелов, В.А. Кадетов, *Письма в ЖТФ* **21**, 78 (1995).
15. Д.Л. Кирко, П.В. Самончев, А.А. Мартынов, А.С. Савелов, С.К. Димитров, С.К. Жданов, В.М. Смирнов, К.Н. Коротаев, *Препринт МИФИ 021-92* (1992).
16. Д.Л. Кирко, А.С. Савелов, *Фундаментальные проблемы естествознания и техники*, Изд-во С.-Петербургского ун-та, С.-Петербург, **26**, 61 (2003).
17. D.L. Kirko, A.S. Savjolov, and I.D. Egorov, *Proc. IV Intern. Conf. AIS-2014* (23–28 June, 2014), Baltic State University Publishing, Kaliningrad, 180 (2014).
18. Р.Ф. Авраменко, Б.И. Бахтин, В.И. Николаева, Л.П. Поскачеева, Н.Н. Широков, *ЖТФ* **60**, 57 (1990).
19. С.К. Димитров, С.К. Жданов, Д.Л. Кирко, А.С. Луцько, С.Г. Михин, В.М. Смирнов, В.Г. Тельковский, *Сиб. физ.-техн. журн.* **2**, 57 (1992).
20. В.Л. Левшин, *Фотолюминесценция жидких и твердых веществ*, Гос. изд-во техн.-теор. лит., Москва–Ленинград (1951).
21. Л.В. Левшин, А.М. Салецкий, *Люминесценция и ее измерение*, Изд-во Моск. ун-та, Москва (1989).
22. S. Jockusch, N.J. Turro, E.K. Thompson, M. Gouterman, J.B. Callis, and G.E. Khalil, *Photochem. Photobiol. Sci.* **7**, 235 (2008).
23. Ю.П. Райзер, *Физика газового разряда*, Издательский дом «Интеллект», Москва (2009).
24. S.F. Adams, C.A. DeJoseph, Jr., and J.M. Williamson, *J. Chem. Phys.* **130**, 144316 (2009).
25. Н.А. Капцов, *Электрические явления в газах и вакууме*, Гос. изд-во техн.-теор. лит., Москва–Ленинград (1950).

## Luminescence of liquid nitrogen after exposure to a pulsed ultraviolet radiation

D.L. Kirko

The optical characteristics of weak prolonged luminescence of liquid nitrogen are studied after exposure to pulse ultraviolet radiation. This contains a volume emission of liquid and localized luminous regions. The luminescence spectrum of liquid nitrogen in the visible and ultraviolet regions is studied. The ultraviolet radiation parameters that influence the luminescence excitation of liquid nitrogen are studied. A possible scheme of volume emission of liquid nitrogen and a hypothesis for the formation of localized luminous region are discussed.

PACS: 78.55.Bq Luminescence of liquids;  
78.40.Dw Absorption spectra of liquids.

Keywords: luminescence of liquid nitrogen, localized luminous regions.