

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Расчёт плотности энергии кремниевых светящихся шаров подобных шаровой молнии

Г.С. Пайва, Дж.В. Феррейра, К.К. Бастос, М.В.П. дос Сантос, А.К. ПавАО

*Плотность энергии кремниевых светящихся шаров [Phys. Rev. Lett. **98** 048501 (2007)] вычисляется с помощью сферической модели, представляющей собой металлическое ядро, окружённое атмосферой из окисляющегося кремния. Экспериментальные данные в сочетании с молекулярными расчётами энтальпии реакции окисления методом орбиталей приводят к средней плотности энергии в шаре $3,9 \text{ МДж м}^{-3}$, которая находится в том же диапазоне плотностей энергии, что и различные оценки для природной шаровой молнии. Настоящий вывод свидетельствует в пользу теории кремниевой шаровой молнии.*

PACS numbers: 52.80.Mg, 92.60.Pw

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201002g.0218

Содержание

1. Введение (218).
 2. Модель кремниевых светящихся шаров (220).
 3. Результаты и обсуждение (220).
 4. Выводы (222).
- Список литературы (222).

1. Введение

Шаровая молния (ШМ) представляет собой светящееся явление, иногда ассоциирующееся с грозами. Она принимает форму долгоживущей светящейся сферы, в отличие от недолговечной искры между двумя точками, как, например, обычная линейная молния. Согласно сообщениям, собранным от тысяч наблюдателей за последние два столетия, ШМ представляет собой светящийся шар, наблюдаемый в природе, чаще всего после удара обычной линейной молнии, либо вблизи неё или на некотором расстоянии от линейной молнии. Диаметр ШМ может быть от нескольких сантиметров до нескольких метров. Она может парить на высоте от нескольких метров до десятков метров, но она может также подпрыгивать или катиться по земле. ШМ может быть разного цвета, иногда были замечены изменения цвета в процессе её существования, иногда ШМ имеет внутреннюю структуру, такую, как, например, светящиеся слои или движущиеся искры. Иногда она исчезает беззвучно, а иногда взрывается с сильным грохотом. Генерирование искус-

ственных светящихся шаров различными способами и усмотрение их аналогии с природной ШМ дало повод для появления множества теорий о происхождении шаровой молнии [1 – 19].

Давид Тёрнер [4] предположил, что ШМ является плазмой, окружённой молекулами воды, гидратированной плазмой и аэрозолями азотной и серной кислот. Аномальные свойства ШМ, видимо, являются следствием электрохимических процессов, которые возникают на поверхности плазмы в контакте с влажным воздухом. Структура и стабильность ШМ поддерживаются этими процессами, и она работает как термохимический тепловой насос, получивший энергию от электрического поля грозы. ШМ иногда может развиваться из огня Святого Эльма, имеющего редкую сферическую форму. За последние несколько лет автор статьи [4] время от времени пытался получить огонь Святого Эльма сферической формы в большой камере с контролируемой влажностью. Предполагалось, что ШМ может быть отделена от проводника. Однако автор [4] никогда не был в состоянии управлять всеми необходимыми переменными процесса, контроль которых, кажется, является существенным. Вероятно, по этой причине он даже не смог получить большой коронный разряд сферического вида, с которым, как он полагает, это явление связано.

Бычков [2] считает, что ШМ возникает в результате агрегации природных полимеров, таких как лигнин и целлюлоза, сажа, полимерные кремниевые и другие природные частицы пыли, образующиеся при ударе линейной молнии в деревья. Способность светиться объясняется появлением по периметру ШМ газовых разрядов около её высоко заряженной поверхности, электрические пробой происходят в некоторых областях на поверхности, состоящей из полимеризовавшихся и переплетённых нитей. Ряд экспериментов [12] был проведён для проверки выводов этой теории. Также пылающие сферы были получены в разряде с использованием древесины [13].

Г.С. Пайва, Дж.В. Феррейра, К.К. Бастос, М.В.П. дос Сантос, А.К. ПавАО. Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco, 50740-540, Recife, Pernambuco, Brazil
E-mail: pavao@ufpe.br

Статья поступила 10 апреля 2009 г.,
после доработки 27 ноября 2009 г.

Капица [14] предположил, что шаровая молния возникает в пучностях электромагнитной волны радиочастотного диапазона, электромагнитная волна образуется между землёй и грозовой тучей. Осуки и Офурутон [15] и Офурутон и др. [16] получали светящиеся шары, используя микроволновое излучение в полости, заполненной воздухом, движения их аналогичны тем, которые наблюдаются в природе у ШМ (как через керамические пластинки, так и против ветра).

Согласно работе Мещерякова [17], процессы электрохимического окисления в пределах отдельных аэрозольных частиц лежат в основе феномена шаровой молнии, которая является облаком из композитных нано- или субмикронных частиц, где каждая частица оказывается спонтанно сформированной нанобатарежкой, которая из-за малого размера уже в процессе своего формирования претерпевает короткое замыкание внутренне-поверхностным разрядом. Таким образом, как свободные, закороченные поверхностными электрическими пробоями токовые контуры, аэрозольные нанобатарежки подвергаются мощному взаимному магнитному диполь-дипольному притяжению. Газообразные продукты, в первую очередь такие, как водород, угарный или углекислый газ, и тепловая энергия, производимая каждой нанобатарежкой в результате внутри-частичных самоподдерживающихся электрохимических реакций, обуславливают взаимное отталкивание этих наночастиц на малых расстояниях и таким образом предотвращают их агрегацию. В то же время, коллективизация токовых контуров отдельных частиц, возникающая благодаря электродуговому перекрытию между смежными частицами, сильно ослабляет их взаимное магнитное притяжение на малых расстояниях. Разрядные токи от нескольких ампер до нескольких тысяч ампер, а также предвзрывные мегаамперные разрядные токи, генерированные в окислительно-восстановительных реакциях и распределённые между всеми аэрозольными наночастицами с их огромной высокоразвитой поверхностью, объясняют как магнитное притяжение между элементами вещества ШМ, так и впечатляющие электромагнитные эффекты, часто демонстрируемые ШМ.

Абрахамсон и Диннис [5] предположили, что ШМ существует благодаря окислению наночастиц Si в атмосфере. При высокой температуре, созданной ударом линейной молнии, оксиды кремния и углерод, содержащиеся в почве, переходят в газообразное состояние и химически взаимодействуют, восстанавливая оксид до металлического кремния: $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$. Прохождение молнии через песок обсуждается в работе Андрианова и Сеницына, в которой представлена фотография образующегося фульгурита при электрическом разряде через песок [20]. Горячие пары Si, охлаждаясь в атмосфере воздуха, конденсируются в аэрозоль, размеры частиц которого порядка нанометров. Электрические заряды, образовавшиеся при высокой температуре, собираются на поверхностях частичек аэрозоля и способствуют компоновке их в шар, который начинает светиться благодаря высокой температуре окисления Si в атмосфере: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$. Эта модель была расширена Абрахамсоном, который включил при рассмотрении данного процесса широкий круг исходных материалов из почвы или из почвы и древесины, а также включил в рассмотрение металл и пластик или металл и дерево.

Недавно Фуссман получил над поверхностью воды плазмиды, время жизни которых составляло около 0,3 с и диаметр от 10 до 20 см [18]. Это происходило при зажигании короткого высоковольтного разряда (5 кВ, 60 А) в ёмкости с водой. Спектр излучения плазменных шаров через короткие промежутки времени был получен и проанализирован Фуссманом. Были идентифицированы спектральные линии излучения гидрооксида кальция и других молекул, а также линии атомов и ионов. Был сделан вывод, что начальная температура шара порядка 5000 градусов и что она падает почти вдвое в течение первой десятой доли секунды. Это довольно горячая плазма, содержащая электроны и положительные ионы, например, натрия, кальция и меди. Если первые два иона находятся в водопроводной воде в виде солей, то ионы меди образуются от электродов.

Ранее мы провели эксперименты с электрическими дугowymi разрядами через чистый кремний для получения светящихся шаров со временем жизни порядка секунд и некоторыми свойствами, обычно наблюдаемыми у природной ШМ [19]. Мы использовали кремниевые (Si) образцы двухдюймового диаметра с ориентацией плоскостей (111) или (100), с удельным электрическим сопротивлением от 0,02 до 1 Ом см, с легированием р-типа, пластины из которых толщиной 350 ± 50 мкм размещали на плоском стальном электроде, используемом в качестве базового электрода толщиной 5 мм и площадью 1000×1000 мм, к которому сверху подвели вольфрамовый (или графитовый) верхний электрод, как показано на рис. 1а. Верхний электрод 4 мм в диаметре и 30 см длиной. Напряжение на вторичной обмотке находится в диапазоне от 20 до 25 В, и ток колеблется от 100 до 140 А. Движение верхнего электрода осуществляется рукой оператора. Оператор мягко касается

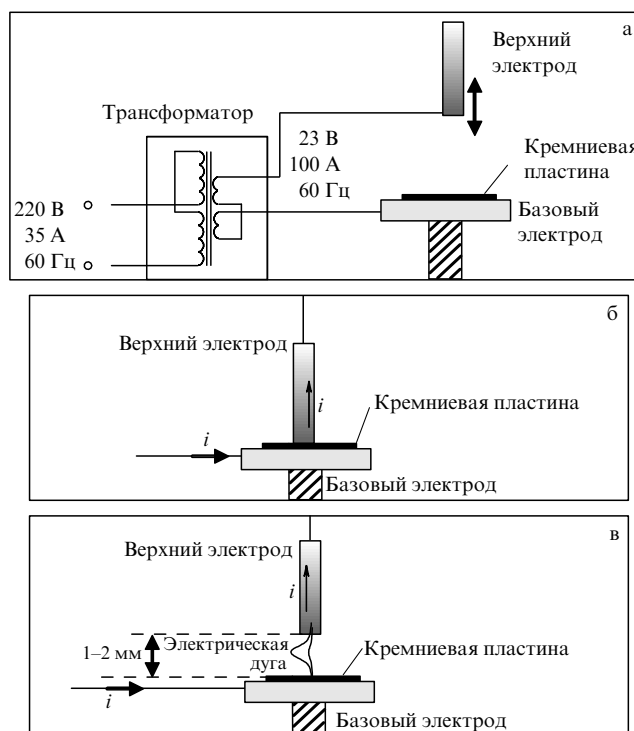


Рис. 1. Экспериментальная установка, схема электропитания, геометрия расположения электродов и пластины кремния.

верхним электродом кремниевой пластины, лежащей на базовом электроде, и замыкает электрическую цепь, как показано на рис. 1б. Затем верхний электрод поднимается вверх примерно на 1–2 мм. При этом движении формируется электрическая дуга, как показано на рис. 1в. При движении вверх с верхнего электрода срываются горячие светящиеся фрагменты и, в конце концов, подобные ШМ светящиеся шары, которые разлетаются в разных направлениях.

В процессе разряда много маленьких горячих светящихся фрагментов разлетается во все стороны. В разряде также имеются светящиеся шары, напоминающие явление шаровой молнии и имеющие чётко выраженное поведение. Их видимый диаметр находится в диапазоне 1–4 см, что намного больше, чем типичный маленький фрагмент. Кроме того, время их жизни может быть до 8 с, в то время как маленькие фрагменты остывают очень быстро, примерно за 1 с. Шары оставляют над собой следы дыма. Кажется, что шары вращаются, потому что следы дыма имеют тенденцию формироваться в воздухе, как правило, в форме спирали. Кроме того, изменение угла наклона оси вращения шаров (например, с вертикального в горизонтальное) может быть причиной внезапного увеличения скорости и изменения в направлении в их движения, как это можно видеть в широко доступном для общественности видео [21]. Светящиеся шары подпрыгивают, как упругие шары, огненные струи от его турбулентной поверхности придают импульс шару вперёд или вбок. Эти шары являются горячими (они сожгли пенополистирол и подожгли хлопок, смоченный этанолом при контакте с ними) и распадаются, не оставляя следов.

Часто говорят о том, что ШМ представляет существенную опасность, что её воздействие может привести к смерти и серьёзным повреждениям. Однако из ряда публикаций следует, что ШМ не может быть объектом, содержащим высокую энергию [5, 9, 10]. Например, Стенхофф [9] утверждает, что все сильные эффекты, ассоциирующиеся с ШМ, в действительности связаны с действием линейной молнии и что ШМ создаёт своего рода маршрут для атмосферных токов. Стаханов (1979) [11] предположил, что плотность энергии средней ШМ составляет приблизительно $20\text{--}30\text{ МДж м}^{-3}$ и высказывает мнение, что ШМ может снимать заряды, которые накапливаются на поверхностях различных объектов в условиях грозы, и затем переносить их, что сопровождается высокоэнергетическими эффектами.

В настоящей статье мы вычисляем среднюю плотность энергии кремниевых светящихся шаров (КСШ), полученных в наших предыдущих экспериментах, и она составила $3,9\text{ МДж м}^{-3}$. Это значение находится в том же

самом диапазоне плотностей энергии, что и вычисленные различными авторами для природной ШМ. Настоящий вывод является дополнительным аргументом при рассмотрении КСШ как аналога природного явления.

2. Модель кремниевого светящегося шара

Давайте рассмотрим модель КСШ (рис. 2), в которой ядро из металлического кремния окружено атмосферой окисляющихся атомов кремния:

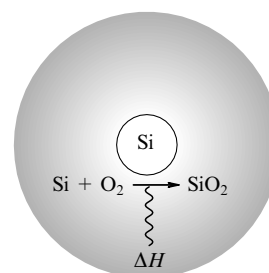
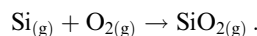


Рис. 2. Модель КСШ. Показано горячее конденсированное ядро, окружённое атмосферой из окисляющегося кремния.

Модель КСШ согласуется с недавно сообщённым наблюдением шаровой молнии [3] и с теорией, разработанной Абрахамсоном и Диннисом [5]. Согласно этой теории, при высоких температурах, созданных ударом молнии, двуокись кремния в почве переходит в металлическую форму кремния. Из быстро охлаждаемых горячих паров кремния образуется аэрозоль с частицами нанометровых размеров. Шары появляются, как только кремний начинает окисляться кислородом воздуха. Скорость окисления, однако, ограничивается необходимостью диффузии кислорода через образующийся кремний-оксидный слой на поверхности шара. Мы считаем, что наиболее важным источником энергии в КСШ является экзотермическая реакция окисления кремния, происходящая в этой сфере. Подробности расчёта приведены в следующем разделе.

3. Результаты и обсуждение

Давайте вычислим температуру КСШ. Как показала видеосъёмка (рис. 3), КСШ имеет оранжево-белый цвет в течение всего срока своего существования, что свидетельствует о постоянной или почти постоянной температуре шарика.

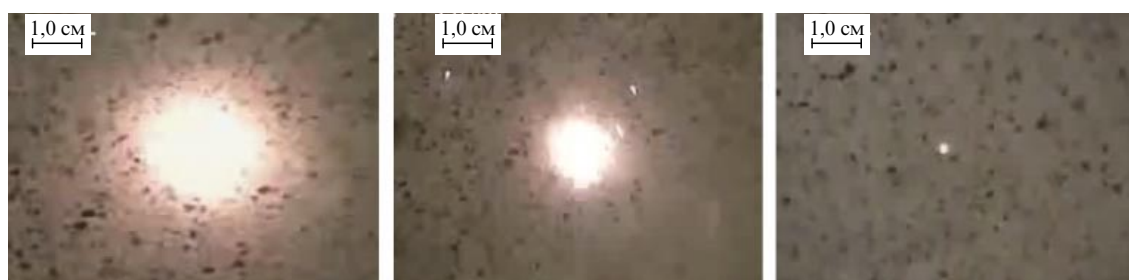


Рис. 3. Видеокдры распада светящегося шара. Временной интервал между кадрами 80 мс.

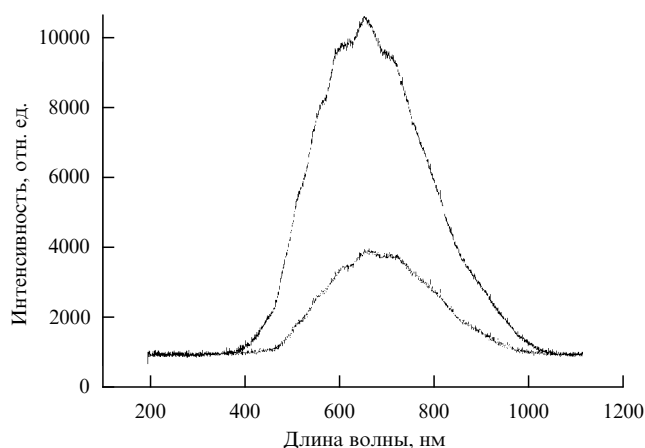


Рис. 4. Оптические спектры двух разных КСШ.

Спектр КСШ, полученный портативным фотоспектрометром (Ocean Optics, USB модель 2000), представлен на рис. 4.

Цветовая температура КСШ может быть вычислена с помощью закона Вина [22]:

$$T = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{\lambda_{\max}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\max}$ — длина волны, соответствующая планковскому максимуму. Согласно рис. 4, $\lambda_{\max} = 675$ нм, что даёт $T = 4296$ К. Недавно Стефан и Месси [23] сделали грубую оценку температуры сферы. Несмотря на то, что они нашли $\lambda_{\max} = 700$ нм, что соответствует $T = 4142$ К, скорректированные экспериментальные данные по относительной интенсивности излучения от сфер дают температуру 3140 К. Однако эта температура соответствует фактическому спектру жидкого кремния, в то время как мы рассматриваем газообразный кремний.

Мы обнаружили, что в наших экспериментах КСШ оставляет след из белого порошка [19]. Наша фурье-преобразующая инфракрасная система, работающая в режиме пропускания, показала, что спектр этих частиц имеет сильное поглощение в полосах 1463 см^{-1} и 2924 см^{-1} , подтверждая образование SiO_2 (рис. 5).

Средняя масса белого порошка, собранная в следе от выбранного светящегося шара, составляла 7×10^{-3} г для каждого КСШ. Энергия, выделяемая при образовании этого порошка, может быть рассчитана с помощью значений тепловыделения реакции образования SiO_2

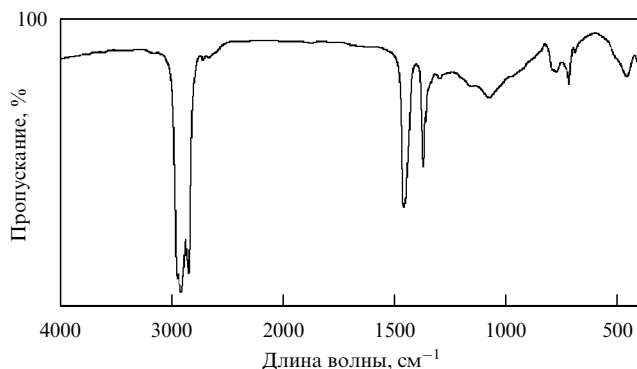


Рис. 5. Инфракрасный спектр поглощения белого порошка, полученного от КСШ.

(ΔH) в газовой фазе. Поскольку данные для реакции образования SiO_2 из газообразного кремния при такой температуре не доступны экспериментально, мы выполнили расчёты методом молекулярных орбиталей, используя различные уровни приближения теории для оценки этих параметров при температуре 4296 К.

Согласно Хелгакеру и др. [24] расчёты *ab initio* методом связанных кластеров (включая однократные, двукратные и трёхкратные возбуждения), с корреляционно-согласованными поляризованными базисными наборами, разработанными Dunning с сотрудниками и обозначенными CCSD(T)/cc-pVTZ, дают точное значение энтальпии реакции [25]. Метод связанных кластеров, хорошо учитывающий динамические электронные корреляции, рассматривает возбуждения между коррелированными парами электронов (парными кластерами) как нелинейные, применяя кластерный оператор к однодетерминантному стандартному состоянию. Кластерный оператор подразделяется на классы для одно-, двух- и трёхкратных возбуждений. Тепло реакции образования SiO_2 определяется как разность между электронной энергией продукта реакции и реагентами в основном состоянии согласно

$$\Delta H = E(\text{SiO}_2) - [E(\text{Si}) + E(\text{O}_2)],$$

где $E(\text{SiO}_2)$, $E(\text{Si})$ и $E(\text{O}_2)$ — электронные энергии (включая энергии основного состояния) плюс термальные вклады, которые составляют $-439,3166897$ а.е. для SiO_2 , $-288,9000116$ а.е. для Si и $-150,1254283$ а.е. для O_2 . Мы находим, что $\Delta H = -755$ кДж мол^{-1} . Включая энтропийные эффекты, которые относятся к энергосодержанию КСШ, мы находим $\Delta H = -273,4$ кДж мол^{-1} , в результате $H = 31,9$ Дж — энергия, выделенная КСШ за время окислительного процесса. Все вычисления выполнены с использованием Gaussian03 Program.

Плотность энергии (ПЭ) КСШ определяется по формуле

$$\text{ПЭ} = \frac{W_t}{(4/3)\pi R^3}. \quad (2)$$

Возьмём средний радиус КСШ $R = 1,25 \text{ см}^{-1}$, тогда плотность энергии равна $3,9 \text{ МДж м}^{-3}$. В таблице приведены оценки плотности энергии для ШМ нескольких авторов, которые в своих расчётах исходят из подсчёта энергии, необходимой для разрушений, которые вызваны этим природным явлением.

Из таблицы видно, что наша расчётная плотность энергии КСШ находится в том же диапазоне значений, что и для ШМ (с диаметром того же порядка, как у КСШ), что и у Стаханова [11], Имянитова и Тихого [26] и Барри [10]. Таким образом, КСШ может быть включён в

Таблица. Средний диаметр и плотность энергии различных ШМ

Наблюдения/ автор	Диаметр, м	Плотность энергии, МДж м^{-3}
Стаханов [11]	0,08	25,85
Стаханов [11]	0,055	$1,99 \times 10^2$
Имянитов и Тихий [26]	0,07	6,25
Стенхофф [9] (случай 1981 г., с. 65)	0,0175	$2,4 \times 10^2$
Стенхофф [9] (событие в Сметвике)	0,099	6
Барри [10]	0,098	0,8
Настоящая работа	0,025	3,9

категорию ШМ. Важно отметить, что наши кремниевые ШМ имеют относительно малый диаметр, что может быть связано с экспериментальными условиями, в которых мы их получаем. Например, мы использовали напряжение 20–25 В и ток 100–140 А в электрических разрядах, но природные условия являются весьма различными. Мы указывали, что использование чистого Si, вероятно, оптимизировало испарение кремния, так что светящиеся шары, похожие на ШМ, могут появляться при токах намного более низких, чем токи в разрядах линейных молний [1]. Одним несоответствием, на которое должно быть обращено внимание, является различие между рассказами очевидцев о видимом диаметре этих сфер (ШМ) и их истинным диаметром. Как указано Стефаном и Месси [23], в случае кремниевых сфер различие может быть объяснено облаком частиц, которое окружает сферу в движении. Даже фотографии светящихся кремниевых шаров производят впечатление, что диаметр сфер составляет 1 см. Если мы возьмем этот радиус шара для наших вычислений, то плотность энергии будет приблизительно в шестнадцать раз выше.

4. Выводы

Содержание энергии в КСШ оценено с помощью экспериментальных данных и расчётных данных по выделению тепла при окислении кремния при высокой температуре. Выделяемая КСШ с радиусом 1,25 см полная расчётная энергия составляет 31,9 Дж, что даёт величину плотности энергии для этого шара $3,9 \text{ МДж м}^{-3}$, которая находится в достаточно хорошем согласии с оценками многих авторов для природной ШМ. Представляется весьма вероятным, что ШМ может содержать в своём небольшом объёме достаточное количество тепловой энергии для проявления высокоэнергетических воздействий, проявляющихся в некоторых наблюдениях.

Мы подчёркиваем, что наш эксперимент с КСШ не привлекает источники энергии и механизмы возбуждения, невероятные в природном явлении, и ясно демонстрирует роль испарения и окисления кремния, как предложено теорией Абрахамсона – Динниса для формирования ШМ [5]. На основании вышеизложенного объясняется образование светящихся шаров с большим временем жизни и некоторыми свойствами, наблюдаемыми в природной шаровой молнии (продолжительное движение с изменением направления и скорости, деление на меньшие шары, испускание искр, вибрирующая поверхность, благодаря которой шары могут катиться и, наткаясь на преграду, подпрыгивать, проникать в ограниченное пространство, сжигать объекты при контакте, иметь вид ворса или пуха из ваты, яркий оранжево-

белый цвет при сферической форме без хорошо определённых границ и временем жизни 2–5 с).

Эта работа добавляет новые свидетельства в пользу теории кремниевой шаровой молнии.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Елдер А. де Васконселос, Ерониес Ф. да Силва, Джерэли и Луисо Асиоли, сотрудникам физического факультета Федерального университета штата Пернамбуку за помощь в подготовке настоящей работы. Эта работа финансируется бразильскими научно-исследовательскими агентствами CAPES и CNPq.

Перевёл с английского Г.Д. Шабанов

Научные консультанты перевода Е.Н. Рагозин, И.В. Святанько

Список литературы

1. Barry J D *Ball Lightning and Bead Lightning: Extreme Forms of Atmospheric Electricity* (New York: Plenum Press, 1980) [Барри Дж Д *Шаровая молния и чёткая молния* (М.: Мир, 1983)]
2. Bychkov V L *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **360** 37 (2002)
3. Singer S *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **360** 5 (2002)
4. Turner D J *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **360** 107 (2002)
5. Abrahamson J, Dinniss J *Nature* **403** 519 (2000)
6. Matthews R *New Scientist* (2233) 23 (2000)
7. Abrahamson J, Bychkov A V, Bychkov V L *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **360** 11 (2002)
8. Uman M A *Lightning* (New York: McGraw-Hill, 1969) p. 230
9. Stenhoff M *Ball Lightning: An Unsolved Problem in Atmospheric Physics* (New York: Kluwer Acad., 1999) p. 24
10. Barry J D J. *Geophys. Res.* **85** (C7) 4111 (1980)
11. Стаханов И П *Физическая природа шаровой молнии* (М.: Атомиздат, 1979)
12. Емелин С Е и др. *ЖТФ* **67** (3) 19 (1997) [Emelin S E et al. *Tech. Phys.* **42** 269 (1997)]
13. Слюсарев Н М "Шаровая молния и древесина", в сб. *Шаровая молния* (Под ред. Б М Смирнова) (М.: ИВТАН, 1990) с. 18–29
14. Капица П Л *ЖЭТФ* **57** 1801 (1969) [Kapitza P L *Sov. Phys. JETP* **30** 973 (1970)]
15. Ohtsuki Y H, Ofuruton H *Nature* **350** 139 (1991)
16. Ofuruton H et al. *J. Geophys. Res.* **106** (D12) 12367 (2001)
17. Meshcheryakov O *Nanoscale Res. Lett.* **2** 319 (2007)
18. Fußmann G *Phys. unserer Zeit* **39** 246 (2008)
19. Paiva G S et al. *Phys. Rev. Lett.* **98** 048501 (2007)
20. Андрианов А М, Синицын В И *ЖТФ* **47** 2318 (1977) [Andrianov A M, Sinitsyn V I *Sov. Phys. Tech. Phys.* **22** 1342 (1977)]
21. Real Ball Lightning Created in the Lab, <http://www.youtube.com/watch?v=KVVDU-6opEqA&feature=fw>
22. Lang K R *Astrophysical Formulae: A Compendium for the Physicist and Astrophysicist* 3rd ed. (New York: Springer, 1999)
23. Stephan K D, Massey N J. *Atm. Sol. Terr. Phys.* **70** 1589 (2008)
24. Helgaker T, Jørgensen P, Olsen J *Molecular Electronic-Structure Theory* (Chichester: Wiley, 2000)
25. Kendall R A, Dunning T H (Jr.), Harrison R J J. *Chem. Phys.* **96** 6796 (1992)
26. Имянитов И М, Тихий Д Я *За гранью законов науки* (М.: Атомиздат, 1980)

Energy density calculations for ball-lightning-like luminous silicon balls

G.S. Paiva, J.V. Ferreira, C.C. Bastos, M.V.P. dos Santos, A.C. Pavão

Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco,
50740-540, Recife, Pernambuco, Brazil. E-mail: pavao@ufpe.br

The energy density of a luminous silicon ball [*Phys. Rev. Lett.* **98** 048501 (2007)] is calculated for a model with a metal core surrounded by an atmosphere of silicon oxides. Experimental data combined with the molecular orbital calculations of the oxidation enthalpy lead to a mean energy density of 3.9 MJ m^{-3} , which is within the range of estimates from other ball lightning models. This result provides a good evidence to support the silicon-based model.

PACS numbers: 52.80.Mg, 92.60.Pw

Bibliography — 26 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **180** (2) 218–222 (2010)

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201002g.0218

Received 10 April 2009, revised 27 November 2009

Physics — Uspekhi **53** (2) (2010)