

М. В. Дойникова¹, А. О. Белаш¹

¹АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КВАНТОВОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

Статья посвящена наиболее важным вопросам технологии изготовления оптических элементов квантового магнитометра. К таким элементам относят: ячейки поглощения, источники спектрального излучения, оптические фильтры и т.п., в составе которых на данный момент широко используются электродные высокочастотные (ВЧ) и безэлектродные лампы. Проведен анализ методов получения плазменного разряда и определения давления в лампах, а также представлен механизм получения резонансного излучения. Для достижения расчетных значений показателей квантовых магнитометров, таких как чувствительность, долговечность, динамический диапазон, необходимо точно знать влияние отклонений технологических параметров рабочего вещества, буферного газа, антирелаксационных покрытий. Для этого предлагается проводить математическое моделирование физико-химических процессов, протекающих в оптических элементах. Рассмотрено влияние диффузии щелочного металла в материал колбы источника излучения на долговечность изделий.

Ключевые слова: квантовый магнитометр, галогеновая лампа, источник спектрального излучения, ячейка поглощения, антирелаксационные покрытия

Введение

В последнее время актуальны вопросы разработки и производства магнитометров различного назначения. Наибольший интерес представляют квантовые магнитометры, однако их изготовление в промышленном масштабе достаточно сложно по причине утери технологий. В статье проведен обобщенный анализ основных элементов квантового магнитометра, рассмотрены процессы, протекающие в газоразрядных лампах (ГЛ), являющихся его составными частями.

Газоразрядные лампы

В основе работы ГЛ положен принцип возникновения электрического разряда, который возникает между электродами. Форма колбы и электродов может быть различной. Внутреннее пространство колбы лампы вакуумируется и тщательно обезгаживается, т.е. удаляются сорбированные в материале колбы и электродов остаточные пары воды и газов, после чего происходит заполнение объема ГЛ инертным газом (или инертным газом и небольшим количеством металла с высокой упругостью паров) до заданного давления.

Номинальный режим работы лампы устанавливается только через некоторое время после включения.

Известно несколько способов получения плазменного разряда в газоразрядных лампах, которые можно разделить по типу физических процессов, вызывающих возникновение плазмы:

1. Нагрев вещества. Электрическую проводимость газа можно наблюдать при температуре порядка 2000–3000 °С. Такой температуры достаточно для создания слабоионизованной плазмы. У щелочных металлов электрон, находящийся на внешней оболочке, слабее связан с ядром, чем у других элементов периодической таблицы, соответственно, энергия ионизации у таких металлов ниже. При достижении необходимой температуры число частиц с энергией, превышающей порог ионизации, позволяет создать слабоионизованную плазму.
2. Несамостоятельный разряд. Использование газового разряда позволяет создать в ГЛ заряженные частицы, при движении которых в электрическом поле возникает электрический ток. Для его поддержания необходимо, чтобы отрицательный электрод (катод) испускал в плазму электроны, что осуществляется путем нагрева катода или его облучения.

3. Самостоятельный разряд. Необходимым условием образования плазмы является постоянное и быстро меняющееся во времени и направлении электрическое поле.

Одним из направлений применения ГЛ, в которых плазмообразование возникает под воздействием СВЧ-облучения, является квантовая магнитометрия, так как все высокотемпературные электроды, используемые в ГЛ общего применения, являются магнитными материалами.

При столкновении электрона с молекулой в газоразрядной электродной лампе происходит передача части энергии от электрона к молекуле. При неупорядоченном движении электронов общая энергия возрастает до значения, при котором происходит процесс возбуждения или ионизации молекулы. С этого момента часть соударений перестают быть упругими и сопровождаются потерей энергии, которая необходима для ионизации молекул; при этом электроны получают ее не за один свободный пробег, а постепенно накапливают. В результате процесс ионизации позволяет получить большое количество электронов и ионов, а именно – плазму.

Определение давления в газоразрядной лампе

Основной проблемой применения ГЛ в качестве спектрального источника света является зависимость параметров излучения от давления паров металла и газов. Существует несколько спектральных методов определения давления в лампах:

1. Метод, основанный на зависимости соотношения потоков излучения линий атомов газа и щелочного металла положительным столбом разряда при фиксированном токе разряда. Такой метод требует больших временных затрат, для его использования необходимо специальное спектральное оборудование, при этом точность результатов очень низкая.
2. При частичном устранении недостатков первого метода был предложен метод определения давления газа по напряжению зажигания ВЧ-разряда на частотах до 40 МГц между двумя электродами, расположенными на поверхности ГЛ. Определение давления в этом случае получается с помощью градуировочной кривой. Основным недостатком метода является необходимость использования высокочастотного генератора [1].
3. Метод определения давления газа в лампе по напряжению погасания разряда. При использовании данного метода с целью расширения диапазона измеряемых давлений газа на рабочие электроды лампы подается высоковольтный импульс, который инициирует зажигание

основного высокочастотного разряда между внешними электродами. Недостатками метода являются необходимость подачи высоковольтного напряжения на электроды лампы, а также применение сложной измерительной схемы [1].

4. В [1] предложен метод определения давления газа в ГЛ по графику зависимости напряжения зажигания разряда от давления. Данный метод заключается в том, что внешние электроды размещаются на центральной части лампы, при этом расстояние между электродами фиксировано. При приложении к этим электродам модулированного по амплитуде ВЧ-напряжения получают разряд. К недостаткам метода можно отнести высокое напряжение «поджига» разряда между внешними электродами, утечку тока по поверхности лампы, необходимость ВЧ-модуляции напряжения.
5. Метод определения давления в разрядных лампах, при котором внешние электроды размещаются и фиксируются на центральной части лампы, измеряется напряжение пробоя между ними, затем определяется давление по графику зависимости напряжения пробоя от давления газа. Отличительной особенностью данного метода является то, что после размещения и фиксации внешних электродов между ними возбуждают два поперечных разряда и устанавливают токи разрядов, протекающих между электродами. Далее увеличивают напряжение до зажигания продольного разряда в промежутке между электродами и по измеренному напряжению пробоя определяют давление газа в лампе [1].

Вторым ограничением возможности применения ГЛ в спектральных приборах является зависимость стабильности излучения от количества паров щелочного металла, которое определяется также процессами диффузии металла в стекло колбы.

Под процессом диффузии в газе и плазме понимают движение частиц под влиянием градиента их концентрации. Скорость диффузионного процесса обратно пропорциональна концентрации N и величине градиента [2]:

$$j = -D \frac{dn_0}{dx}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии для любых частиц в случае однополярной диффузии электронов или ионов (например, в пучке электронов (ионов) в электровакуумных приборах) справедливы соотношения Эйнштейна:

$$\mu = eD/kT. \quad (2)$$

В процессе работы газоразрядных электродных ламп происходит процесс диффузии между

Таблица. Состав стекла, применяемого для изготовления колбы лампы

Состав стекла колбы							
Химическое соединение	B ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	SrO	BaO
Массовая доля, %	39,8	0,8	28,2	13,1	15,6	3,5	0,3

ионизированным газом и электродом, а в газоразрядных безэлектродных лампах – между ионизированным газом и рабочим веществом. При нагреве скорость диффузии увеличивается. Несмотря на то, что стекло, из которого изготавливают колбы ламп, устойчиво к воздействию щелочных металлов, диффузионные процессы, протекающие в течение всего жизненного цикла лампы, приводят к ее старению и, соответственно, к ее деградации. Таким образом, с целью прогнозирования срока службы безэлектродной лампы необходимо проводить математическое моделирование физико-химических процессов, происходящих в таких ГЛ.

Была проведена оценка диффузии атомов щелочного металла (К) в стекло колбы ГЛ.

В качестве материала, применяемого для изготовления колбы лампы, применялось специальное стекло, состав которого представлен в таблице.

Как видно из рис. 1, наибольшая скорость диффузии атомов калия в стекло наблюдается в первые пять – шесть лет, при этом, как и положено, скорость диффузии увеличивается при повышении температуры.

Таким образом, основной задачей становится модификация материала стекла с целью снижения диффузионных процессов.

Механизм получения резонансного излучения

Газоразрядная электродная лампа представляет собой прозрачный колбу, заполненную ионизированным газом (аргон, неон, криптон или натрий,

ртуть) с запаянным внутрь электродом. При включении схемы в сеть электропитания происходит нагревание поверхности металла, в результате чего с его поверхности вылетают электроны с отрицательным зарядом, металл при этом заряжается положительно. В результате возникает электрическое поле, которое и удерживает часть вылетевших электронов, т.е. создается своего рода электронное облако. При этом часть электронов возвращается в металл, а часть вылетает обратно. Образовавшееся поле свободных электронов образует включения в газе, происходит столкновение электронов с газом и атомами металла. Чтобы поддерживать процесс образования свободных электронов, необходимо пополнение пространства электронами. Это возможно сделать с помощью металлического катода, т.е. сообщить ему дополнительную энергию с целью преодоления удерживающих сил. Такую энергию можно сообщить двумя способами:

1. Термоэлектронная эмиссия. При использовании данного способа происходит подогрев катода электрическим током от внешнего источника питания. При увеличении нагрева движение электронов в катоде усиливается, и те электроны, которые получили количество энергии, достаточное для преодоления электростатических сил, вылетают с поверхности металла [3].
2. Автоэлектронная эмиссия. Способ заключается в создании сильного электрического поля вблизи холодного катода, в результате чего электроны вырываются с поверхности металла. В зависимости от запасенной кинетической энергии электрона, оказавшегося в межэлектродном пространстве, благодаря ускорению электрическим полем в момент столкновения с нейтральным атомом соударение может быть упругое или неупругое. В первом случае электрон имеет недостаточный запас энергии, поэтому при соударении нейтральный атом увеличивает свою кинетическую энергию, но при этом структура атома не меняется. Когда электрон имеет достаточный запас кинетической энергии, происходит неупругое соударение частиц. При этом в момент столкновения электрона и нейтрального атома электрон передает часть своей энергии атому, в результате чего один из внешних электронов нейтрального атома переходит на более высокоэнергетическую орбиту. Также электрон

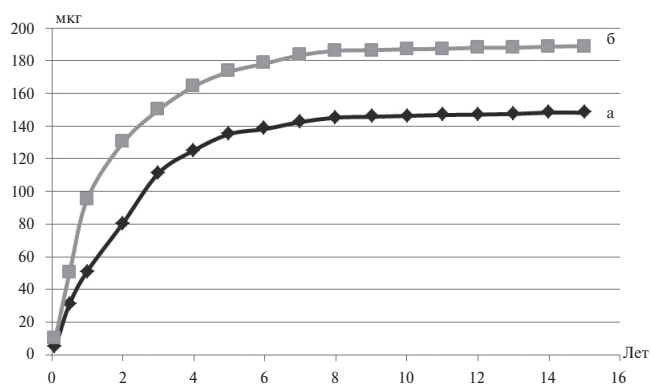


Рисунок 1. Количество калия (расчетное), диффундирующее со временем в стекло при температуре T, равной: а – 300 К; б – 500 К

может оторваться от атома, в результате чего атом превращается в положительный ион [4].

Возбуждение атома происходит за счет процесса перехода электрона с внешней оболочки нейтрального атома на орбиту с повышенным энергетическим уровнем. В зависимости от значения энергии внешний электрон может перейти на тот или иной резонансный уровень. Поскольку атом не может долгое время оставаться в возбужденном состоянии, через очень короткий промежуток времени электрон с резонансного уровня возвращается в нейтральное состояние, в результате чего происходит излучение энергии в виде света с определенными длинами волн. Схематично этот процесс представлен на рис. 2.

Таким образом, подбирая газ или пар металла, а также меняя их давление и плотность тока, можно получить излучение с необходимыми световыми характеристиками.

Газоразрядная безэлектродная лампа представляет собой прозрачную колбу, заполненную ионизированным газом (аргон, неон, криптон) и рабочим веществом (цезий, рубидий, ртуть, теллур, сера). Нагрев лампы осуществляется катушкой, по которой проходит ток высокой частоты, который, в свою очередь, создает сильное переменное электромагнитное поле. При подключении катушки к контейнеру происходит ионизация инертного газа. Ионы газа атомизируют летучие соединения внутри контейнера, что и представляет собой излучение.

Рассмотрим подробнее механизм возникновения резонансного излучения. В результате взаимодействия молекул газа с ВЧ-полем происходит его ионизация. Ионы получают ускорение в ВЧ-поле, набирают энергию, сталкиваются и рекомбинируют, образуя нейтральные молекулы и фотоны. Спектр получаемого излучения находится в красной области спектра. В процессе движения ионы газа сталкиваются с молекулами рабочего вещества, в результате чего происходит процесс ударного возбуждения. Атомы рабочего вещества возбуждаются и переходят на более высокие энергетические уровни. При рекомбинации наблюдается характерный спектр излучения. В случае столкновения этих молекул с ионами газа происходит образование атомарных соединений, атомы которых также переходят на более высокие уровни энергий, а при

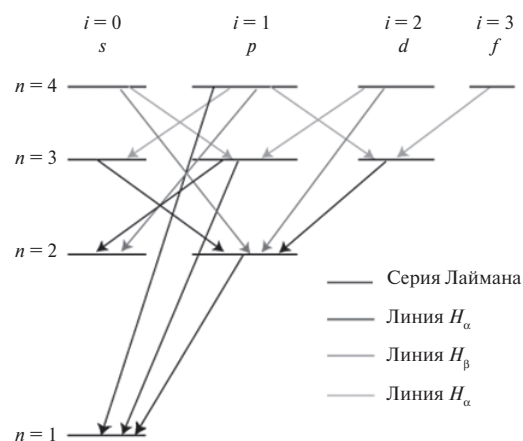


Рисунок 2. Резонансные переходы электрона

переходе на более низкие энергетические уровни испускают фотоны с частотами, соответствующими линиям атомарного спектра.

Выводы

Проведя сравнение электродных (ВЧ) и безэлектродных ГЛ, можно выделить некоторые недостатки, характерные для газоразрядных ламп в целом.

Первый – сложность включения ГЛ. Для их «поджига» требуется напряжение «поджига», большее, чем для поддержания процесса устойчивого горения.

Второй – большая зависимость давления паров рабочего вещества лампы от температуры, что проявляется, в свою очередь, в нестабильности характеристик излучения. Кроме того, это приводит к тому, что номинальный режим работы ГЛ устанавливается только спустя некоторое время после включения. Повторный процесс «поджига» ГЛ с высоким и сверхвысоким давлением газов без специальных приемов возможно только по истечении некоторого времени после выключения. Одним из путей решения такой проблемы является разработка цифровых систем автоматического регулирования ВЧ «поджига».

Как было показано, существенную роль в работоспособности ГЛ играют процессы диффузии атомов щелочного металла в стекло колбы лампы, имеющее состав, представленный в таблице, для чего необходимо проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2199791. H01J9/42. Способ определения давления в разрядных лампах // Свешников В.К., Королев В.И., Куренщиков А.В. Заявитель и патентообладатель: Мордовский государственный педагогический институт им. М.Е. Евсевьева; заявл. 07.02.2001, опубл. 27.02.2003. Бюл. № 6.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика. 2-е изд. М.: Наука, 1976. 480 с.
3. Большая советская энциклопедия. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1971. Т. 6. 720 с.
4. Большой энциклопедический политехнический словарь. М.: Большая Российская энциклопедия, 2004. 656 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дойникова Мария Владимировна, инженер-технолог, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: dojnikova_mv@radar-mms.com.

Белаш Александр Олегович, к.т.н., менеджер проекта, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: belash_ao@radar-mms.com.

For citation: Dojnikova M. V., Belash A. O. Modelling of the processes in high-frequency gas-discharge radiation sources used in quantum magnetometry. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 9, pp. 38–42.

DOI 10.21778/2218-5453-2018-9-38-42

M. V. Dojnikova, A. O. Belash

MODELLING OF THE PROCESSES IN HIGH-FREQUENCY GAS-DISCHARGE RADIATION SOURCES USED IN QUANTUM MAGNETOMETRY

The article is devoted to the most important aspects of the technology of quantum magnetometer optical elements manufacturing such as absorption cells, sources of spark radiation, optical filters and other. At the moment, electrode (high frequency, HF) and electrodeless lamps are widely used as parts of these elements. The analysis of the methods of plasma discharge production and determination of the pressure in the tubes, also the mechanism of resonant radiation obtaining is presented. To rich the calculated parameters of quantum magnetometers, such as sensitivity, durability and dynamical band, it is necessary to know the influence of operating matter, buffer gas, antirelaxation coatings technological parameters deviation. For this purpose it is required to carry out mathematical modelling of physicochemical process in optical elements. The effect of diffusion of an alkali metal into the material of a bulb of a radiation source on the durability is considered.

Keywords: quantum magnetometer, halogen lamp, source of spiral radiation, absorption cell, antirelaxation coatings

REFERENCES

1. Patent RF № 2199791PФ. H01J9/42. *Sposob opredeleniya davleniya v razryadnyh lampah* [Method for measuring pressure in discharge lamps]. Sveshnikov V.K., Korolev V.I., Kurenschikov A.V. Zayavitel i patentoobladatel: Mordovskiy gosudarstvennyj pedagogicheskiy institut im. M.E. Evseveva; zayavl. 07.02.2003, opubl. 27.02.2003. Bul. no. 6 (In Russian).
2. Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Obshchij kurs fiziki. Molekulyarnaya fizika* [General course of physics. Molecular physics]. 2-e izd. Moscow, Nauka Publ., 1976, 480 p. (In Russian).
3. *Bolshaya sovetskaya ehnciklopediya* [The Great Soviet Encyclopedia]. 3-e izd. Moscow, Sovetskaya enciklopediya Publ., 1971, vol. 6, 720 p. (In Russian).
4. *Bolshoj ehnciklopedicheskiy politekhnicheskij slovar* [The Big Encyclopedic Polytechnical Dictionary]. Moscow, 2004, p. 656 p. (In Russian).

AUTHORS

Dojnikova Maria, processing engineer, JSC Research and Production Enterprise Radar mms, 37 A, Novoselkovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: dojnikova_mv@radar-mms.com.

Belash Alexander, project manager, JSC Research and Production Enterprise Radar mms, 37 A, Novoselkovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: belash_ao@radar-mms.com.