

ВЧ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Т. И. ФРОЛОВА, К. А. ВАСЬКО

В работе рассмотрен механизм возбуждения газового разряда для получения газоразрядной низкотемпературной плазмы (НП), а также ее основные элементарные процессы, которые являются определяющими для создания инверсной населенности рабочих уровней (гелий-неоновой плазмы). Проанализированы особенности способов возбуждения НП в разных частотных диапазонах и показаны их достоинства и недостатки. Проведено моделирование высокочастотного (ВЧ) разряда в разрядной области. Показало влияние выходной мощности внешнего сигнала на возбуждение и поддержания стабильной генерации оптического излучения. Результаты подтверждены экспериментальными исследованиями. Полученные результаты представляют интерес для разработчиков оптоэлектронных приборов, работа которых основана на применении гелий-неоновых лазеров.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, источник оптического излучения, ВЧ-разряд, СВЧ-разряд, разряд постоянного тока (РПТ), гелий-неоновая плазма.

ВВЕДЕНИЕ

Создание источников оптического излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра возможно благодаря преобразованию различного вида энергии в энергию оптического излучения [1]. Наиболее распространенными являются газоразрядные (плазменные) источники оптического излучения, которые могут быть когерентными (вынужденное излучение) и некогерентными (спонтанное излучение). К когерентным источникам относятся лазеры различного типа [2, 3], к некогерентным – газоразрядные источники света (ртутные лампы низкого, высокого и сверхвысокого давления, натриевые, ксеноновые и др. лампы [4]), в том числе и современные безэлектродные плазменные лампы с ВЧ и СВЧ возбуждением [5–7].

Смесь электрически заряженных и нейтральных частиц (электронов, ионов, молекул и атомов), образует плазму с разной степенью ионизации [8, 9]. Возникновение оптического излучения связано с изменением энергетических состояний валентных электронов, входящих в состав излучающего тела (плазмы). Спектр излучения определяется энергетическими состояниями, которые могут принимать электроны в результате сообщения рабочему телу внешней энергии, т. е. строением тела, составляющих его атомов и молекул.

Существуют различные методы возбуждения плазмы. В первых, CO_2 и He-Ne лазерах использовался высокочастотный продольный емкостной (ВЧЕ) разряд для создания активной среды [10]. Этому способствовало то, что плазма в ВЧ диапазоне не успевает распасться, поэтому имеет более постоянную плотность, а также электроды не контактируют с активной средой, что повышает срок службы лазера.

Однако в связи с недостаточной изученностью физических особенностей ВЧ-разряда на тот момент этот способ возбуждения плазмы не получил широкого применения.

В настоящее время интерес к возбуждению плазменных источников оптического излучения переменным электромагнитным полем (ВЧ и СВЧ разрядами) постоянно растет [7, 11, 12]. В этом случае уменьшается требуемая мощность для возбуждения плазменной смеси и достигается более равномерное распределение плотности газов, а также СВЧ-разряд позволяет существенно уменьшить габаритные размеры устройств, что является очень актуальной задачей при разработке миниатюрных гироскопов, гелий-неоновых лазеров, безэлектродных плазменных ламп и др.

Целью данной работы является анализ механизма возбуждения газового разряда для создания низкотемпературной плазмы, а также рассмотрение физических особенностей ВЧ возбуждения газов и определения частоты и мощности системы возбуждения плазменных источников оптического излучения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее важными характеристиками плазмы являются температура и степень ионизации. Плазму газового разряда называют низкотемпературной («холодной», $T \ll 10$ эВ), где температура газа для одноатомных газов обычно не превышает 13 000 К, двухатомных – 8 000 К [13]. Низкотемпературная плазма (НП) является неизотермической (или неравновесной) (средняя энергия электронов во много раз превышает энергию ионов и нейтральных частиц $T_e \gg T$) и практически всегда слабоионизованной ($N_n \approx 10^{12} \div 10^{17}$ см⁻³). Газоразрядная НП эффективно используется в различных областях: электронике, осветительной технике,

медицине, плазмохимии и др.. В настоящее время интерес к НП постоянно растет при этом создаются все новые типы или способы получения газового разряда для новых приложений, как, например, пучково-плазменный разряд в плазмохимических технологиях [14, 15].

Газоразрядная НП широко используется в качестве активной среды в газовых лазерах и источниках света. Газоразрядные лазеры (ГРЛ) являются наиболее распространенными приборами квантовой электроники. В зависимости от типа активных частиц ГРЛ делятся на три основные группы: атомарные, ионные и молекулярные. Они различаются по техническим и эксплуатационным характеристикам, а также отраслям применения. Активной средой атомарных ГРЛ служат инертные газы (He, Ne и др.) и их смеси, а также пары некоторых металлов (Cu, Pb, Mn и др.). Лазерными уровнями являются энергетических уровни нейтральных атомов, возбужденных в газовом разряде. К молекулярным относятся ГРЛ с активной средой CO₂, CO, а к ионным – Ar [16]. Наиболее широко распространенным газовым лазером на инертных атомах для видимой области спектра является гелий-неоновый (He-Ne) лазер, который способен, наряду с красными линиями, излучать также оранжевые, желтые и зеленые. Главной проблемой работы газовых лазеров, на основе He-Ne, долгое время является создание эффективной накачки активной среды и стабильность генерационных характеристик лазерного излучения. Так же следует понимать, что физические параметры плазмы до и в процессе генерации излучения имеют влияние на итоговую стабильность работы прибора на основе такого лазера.

Как известно, существенным недостатком газовых лазеров на атомных переходах, в частности He-Ne, является их низкая эффективность (КПД до 0,1 %) [16]. Это приводит, с одной стороны, к увеличению пороговой мощности накачки, с другой – к срыву генерации при ее повышенных удельных мощностях. Поэтому увеличение диапазона мощностей накачки, соответствующих режиму генерации, и уменьшение рабочей длины активной среды является актуальной задачей при создании He-Ne лазеров как малой, так и повышенной мощности.

В процессе развития представления о плазме как о газе заряженных частиц менялись и методы ее количественного описания. Разнообразие способов возбуждения НП ведет к отсутствию универсальной модели, позволяющей определять численные параметры газоразрядной плазмы. Однако необходимость определения оптимальной частоты и мощности возбуждения плазменной среды связана со стабильностью работы источников оптического излучения.

2. МЕХАНИЗМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕЛИЙ-НЕОНОВОЙ ПЛАЗМЕ

Для нахождения численных параметров плазмы требуется понимать, как происходит ее возбуждение и

какие основные процессы влияют на выходные параметры плазменной среды.

На примере He-Ne лазера рассмотрим механизм возбуждения и создание инверсной населенности атомных уровней в гелий-неоновой плазме, представленный еще Джаваном [17] в последствии детально изучался многими исследователями. Непрерывная лазерная генерация в оптическом диапазоне возможна в ИК области на длинах волн 3 391 нм ($3s_2 \rightarrow 3p_4$), 1 118 нм, 1 160 нм, 1 199 нм, 1 207 нм и наиболее сильная генерация наблюдается на – 1 153 нм ($2s_2 \rightarrow 2p_4$) и видимом диапазоне на – 632,8 нм ($3s_2 \rightarrow 2p_4$).

Механизм возбуждения гелий-неоновой плазмы, обеспечивающий инверсную заселенность и усиления света, опирается на неупругие столкновения энергетических электронов с атомами гелия в основном состоянии. Так, при соударениях атомов гелия, находящихся в основном состоянии ($1S_0$), с электронами плазмы тлеющего разряда создаются возбужденные атомы гелия

$$e + He(1S_0) \rightarrow He(2^1S_0) + e - \Delta E, \quad (1)$$

$$e + He(1S_0) \rightarrow He(2^3S_1) + e - \Delta E, \quad (2)$$

где ΔE – энергия, теряемая электроном плазмы при столкновении, т. е. при столкновениях первого рода (1) и (2) кинетическая энергия электрона переходит во внутреннюю энергию атома гелия.

Как показано на схеме энергетических уровней (рис. 1), эти столкновения переводят атомы гелия из основного состояния $1S_0$ в возбужденные метастабильные состояния с большим временем жизни (~1 мс): 2^3S_1 и 2^1S_0 . Так как эти состояния являются долгоживущими по сравнению с излучающими состояниями, основную массу возбужденных атомов гелия в разряде составляют именно эти атомы.

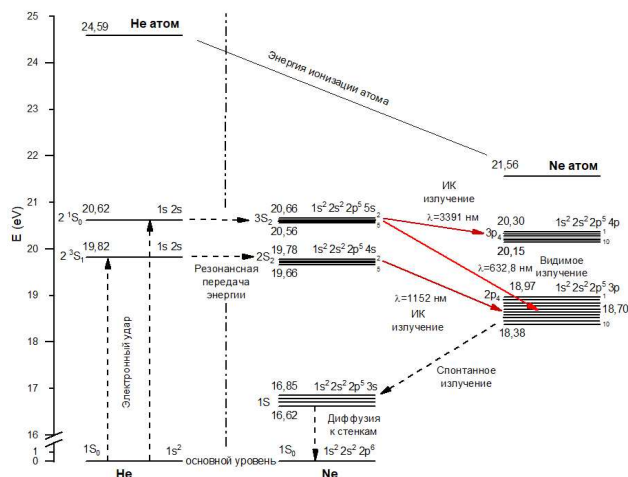
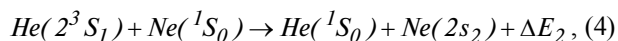
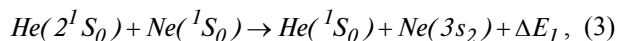


Рис. 1. Схема энергетических уровней He и Ne

Благодаря тому, что энергия атомов двух метастабильных состояний гелия 2^3S_1 и 2^1S_0 близка к состояниям атома неона $3S_2$ и $2S_2$, то их столкновения приводят к передаче энергии возбуждения от гелия к неону. Этот процесс передачи энергии возбуждения записывается уравнениями реакции:



где ΔE_1 и ΔE_2 – разность между энергиями двух атомов энергетических уровней гелия и неона. В процессе неупругих столкновений второго рода (3) и (4) осуществляется накачка верхних рабочих уровней неона $3s_2$ и $2s_2$. Прямое возбуждение уровней неона электронами приводит к заселению нижних уровней $2p_4$ и $3p_4$ неона, что приводит к срыву инверсии. Поэтому концентрация атомов гелия должна в несколько раз превышать концентрацию атомов неона. Оптимальное соотношение давлений He:Ne должно быть 5:1 для $\lambda = 632,8$ нм и 9:1 – для $\lambda = 1150$ нм.

Генерация оптического излучения осуществляется на переходах атома неона, а гелий необходим для повышения эффективности возбуждения за счет резонансной передачи энергии возбуждения уравнения (3), (4). Далее нижние уровни $2p_4$ и $3p_4$ неона спонтанно разрушаются на группу метастабильных уровней $1s$, после чего уходят из разряда в следствии диффузии к стенке.

Верхние уровни длин волн $\lambda_1 = 3,39$ мкм и $\lambda_2 = 0,6328$ мкм в гелий-неоновой плазме совпадают, поэтому оптимальные условия газового разряда оказываются одинаковыми.

На примере гелий-неоновой плазмы, можно сказать, что основными процессами в НП являются элементарные процессы возбуждения и ионизации газа, рекомбинации заряженных частиц, а также процессы переноса заряженных и возбужденных частиц, процессы переноса энергии за счёт теплопроводности, конвекции и др., число которых может достигать нескольких десятков [18].

Рассмотренные процессы типичны для различных видов плазмы, но для каждой конкретной системы могут оказаться важными, определяющими свойства и параметры плазмы, и другие типы процессов. Например, это могут быть процессы колебательной релаксации возбужденных молекул, процессы тушения возбужденных молекул и атомов при столкновении с электронами и нейтральными частицами, процессы разрушения отрицательных ионов и т. д. Поэтому очень важно понимать механизм возбуждения газоразрядной НП и от каких параметров он зависит.

3. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Газовый разряд может возникать в различных частотных диапазонах. Внешнее поле может как посто-

янным (или низкочастотным) во времени электрическим полем (герцы), так и переменным – высокочастотным (ВЧ-разряд, мегагерцы), сверхвысокочастотным (СВЧ-разряд, гигагерцы) и оптического диапазона (оптический разряд, терагерцы) [8–10].

Существует несколько способов возбуждения ГРЛ: разрядом постоянного тока (РПТ), высокочастотная (ВЧ) и сверхвысокочастотная (СВЧ) накачки, а также комбинированная.

3.1. Возбуждение электрическим разрядом постоянного тока

Наибольшее распространение получил способ возбуждения плазмы в газовом разряде путём подведения электрической энергии к газовому объёму через электроды, расположенные внутри камеры (разряд постоянного тока (РПТ)) [19, 20]. При этом генерация газоразрядной плазмы связана не только с протеканием электрического тока в газах, но и с возникновением и поддержанием под действием поля самой способности газа проводить электричество и поглощать электромагнитные излучения.

РПТ накачка осуществляется пропусканием через газовую смесь постоянного тока. Ток через газ может протекать либо вдоль оси разрядной трубки (продольный разряд, рис. 2, а), либо поперёк её (поперечный разряд, рис. 2, б) [21].

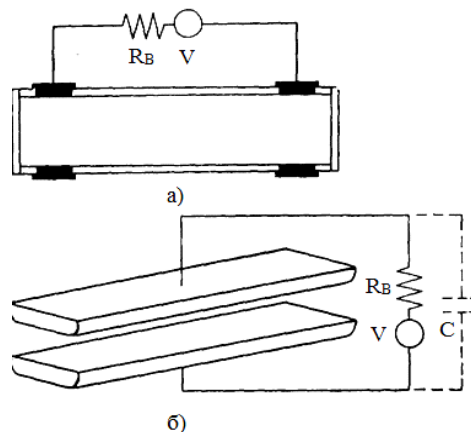


Рис. 2. Схема возбуждения НП с помощью РПТ [21]

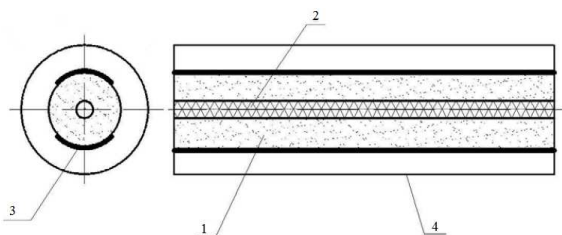
Многолетняя практика использования He-Ne лазеров с РПТ выявила серьезные недостатки (использование высоковольтного источника питания ведет к неудобству при стыковке со схемой стабилизации; уменьшение выходной мощности при долговременной работе из-за катафореза и перераспределения плотности газа внутри активного элемента; высокий уровень собственных шумов излучения, обусловленных наличием реактивных колебаний и страт в газовом разряде, и др.), что привело к использованию для возбуждения гелий-неоновой плазмы поперечный сверхвысокочастотный разряд (ПСВЧР) [22, 23].

3.2. СВЧ возбуждение

Использование энергии СВЧ-излучения для накачки в ГРЛ позволило получить ряд преимуществ:

повышение срока службы; упрощение конструкции излучателя, в связи с отсутствием электродов; уменьшение мощности накачки; более равномерное, по сравнению с РПТ, распределение усиления по сечению [24].

СВЧ-разряды зажигают в резонаторах, в диэлектрической трубке рис. 3 [22], пересекающей волновод; в последнем случае обычно при $p = 1$ атм. Через стеклянную трубку продувают газ. Разрядная плазма квазиравновесна, но температура при мощностях около 1 кВт равна приблизительно 4 000 – 6 000 К. Она не поднимается выше, т. к. от сильнее ионизованной плазмы СВЧ-излучение отражается.



1 – стеклянная трубка; 2 – капилляр; 3 – металлические полоски; 4 – металлический кожух

Рис. 3. Схема He-Ne лазера с СВЧ накачкой

Возможность повышения мощности лазерного излучения во многом определяется видом энергетических характеристик, типичных для таких лазеров.

Как показано на рис. 4 [25], в лазерах с СВЧ-накачкой практически отсутствует участок насыщения и падения лазерной мощности, характерный для He-Ne лазеров с РПТ.

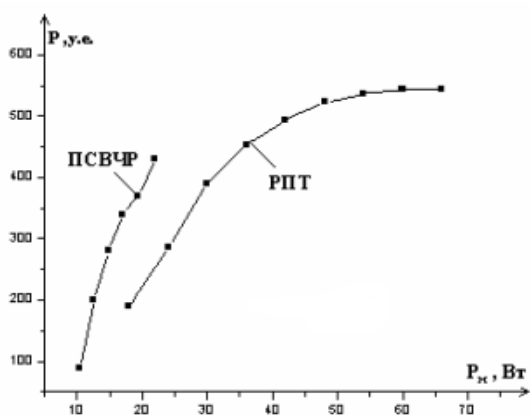


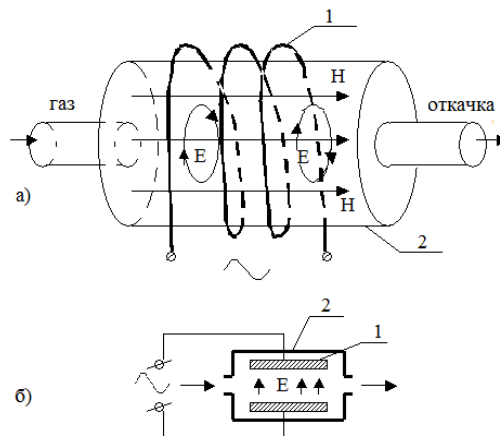
Рис. 4. Зависимости мощности лазерного излучения P от мощности накачки P_n при ПСВЧР и РПТ

Падающий участок наблюдается лишь при малых активных длинах (2 – 3 см) и при мощности накачки, приходящейся на единицу длины, порядка 2,5 Вт/см, что может быть объяснено уменьшением скорости ступенчатого заселения нижнего лазерного уровня неона [22].

3.3. ВЧ возбуждение

Известны два основных способа возбуждения ВЧ разряда – ёмкостной (E) и индукционный (H). Соответственно два вида ВЧ-разряда E -разряд и H -разряд. На рис. 5 изображены типичные способы осуществления индукционного и ёмкостного ВЧ-разрядов. Устройство возбуждения в первом случае имеет вид многовиткового индуктора, внутри которого помещалась разрядная трубка, а во втором – в виде металлических пластин, установленных аксиально.

При низких частотах индукционный разряд малоэффективен в сравнении с ёмкостным. С увеличением частоты до десятков и сотен МГц вкладываемая в H -разряд мощность растет, и он становится более эффективным, чем E -разряд. При аналогичных условиях (одинаковой мощности ВЧ генератора, давления в разрядной камере) плотность плазмы индукционного разряда, в случае высоких частот, становится более высокой, чем ёмкостного. Для E -разряда, вкладываемая мощность с ростом частоты поля уменьшается [22].



а) индукционный разряд:
1 – индуктор, 2 – разрядная камера;
б) ёмкостной разряд: 1 – электроды, 2 – разрядная камера.

Рис. 5. Способы возбуждения НП ВЧ-разрядом

При использовании ВЧ-разряда для возбуждения активной среды лазера необходимо обеспечить стационарное горение разряда. Электронная температура в слабоионизованной плазме, а следовательно и отношение напряженности поля к плотности молекул газа E/H (для слабоионизованного газа плотность газа можно характеризовать давлением p), которое требуется для стационарной поддержки плазмы, определяется условием компенсации рождения электронов и их потерь.

С точки зрения подведения электромагнитной мощности к разрядной камере большое значение имеет неоднородность электромагнитного поля в плазме ВЧ разряда, поскольку именно пространственное распределение напряженности электромагнитного поля

определяет влияние внешнего источника ВЧ энергии на параметры плазмы внутри разрядной камеры. Неоднородность обусловлена тем, что при ВЧ возбуждении газового разряда в щелевой разрядной камере средней мощности длина волны возбуждения сравнима с линейными размерами разрядной камеры. Выравнивание распределения напряженности поля вдоль разрядной камеры следует рассматривать совместно с другими процессами в плазме газового разряда, поскольку даже при условии существования однородного электромагнитного поля разряд может иметь неоднородную структуру. При этом существенную роль играют процессы на границе между неионизированным газом и плазмой. Неравномерность пространственного распределения напряжения влияет на пространственное распределение интенсивности лазерного излучения и выходную мощность лазера. Поэтому необходима поддержка плазмы в квазиоптимальном режиме на каждом участке разрядной камеры.

Для реализации ВЧ возбуждения нужно определить исходные параметры ВЧ-генератора, чтобы возбудить активную среду и поддержать ее стабильную работу.

Так как используется ёмкостный разряд для исследования частотных характеристик, необходимых для поджога газовой смеси использовали электрическую цепь, состоящую из индуктивности L и ёмкости C , в которой образуются электрические колебания (колебательный контур (рис. 6) [13]).

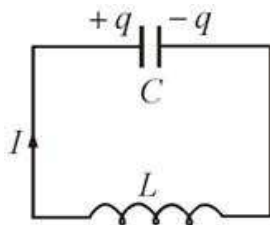


Рис. 6. Параллельный колебательный контур

Имея геометрические размеры разрядного участка, находим параметры параллельного колебательного контура. Индуктивность катушки L и емкость конденсатора C может быть вычислена по формулам приведены ниже, между пластинами которого находится капилляр с активной средой.

$$L = \frac{\left(\frac{D}{10}\right)^2 \cdot n^2}{4,5 \cdot D + 10 \cdot l} = \frac{\left(\frac{11 \cdot 10^{-3}}{10}\right)^2 \cdot 0,5^2}{4,5 \cdot 11 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 3,928 \cdot 10^{-2}} = 683,9 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}, \quad (6)$$

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot b}{d} = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 18,3 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{10^{-2}} = 0,81 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad (7)$$

где D – диаметр катушки, n – количество витков, l – длина провода, a – длина пластин, b – ширина пластин, d – расстояние между пластинами. Колебания в контуре можно вызвать зарядив конденсатор, или вызвав в индуктивности ток (например, включив магнитное поле).

Поскольку активное сопротивление контура $R = 0$, полная энергия остается постоянной. Если энергия конденсатора равна нулю, то энергия магнитного поля максимальна, и наоборот.

Найдем критическое сопротивление контура, при котором колебательный процесс переходит в апериодический [16]:

$$\frac{R_k^2}{4L^2} \geq \frac{1}{LC},$$

отсюда

$$R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2R_{вол} = 2\sqrt{\frac{683,9 \cdot 10^{-9}}{0,81 \cdot 10^{-12}}} = 1,84 \cdot 10^3 \text{ Ом}, \quad (8)$$

где $R_{вол}$ – волновое сопротивление, которое определяется параметрами L и C , $R_{вол} = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Затухания принято характеризовать логарифмическим декрементом затухания χ [15]:

$$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T, \quad (9)$$

где A – амплитуда I , U , q . Найдем выражение χ для электрических колебаний:

т. к. $\beta = \frac{R}{2L}$, $T = \frac{2\pi}{\omega}$, тогда $\chi = \beta T = \frac{\pi R}{L\omega}$. (10)

Поскольку R , L , ω определяются параметрами колебательного контура, следовательно является характеристикой контура. Если затухание невелико, т. е. $\beta^2 \ll \omega_0^2$, то

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{683,9 \cdot 10^{-9} \cdot 0,81 \cdot 10^{-12}}} = 1,34 \cdot 10^9 \text{ рад/с}. \quad (11)$$

Тогда значение резонансной частоты параллельного колебательного контура равно

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1,34 \cdot 10^9}{2 \cdot 3,141} = 213,94 \cdot 10^6 \text{ Гц}. \quad (12)$$

Для ВЧ разряда резонансная частота является критическим фактором для колебательного контура. Необходимо контролировать мощность, т. к. разряд-

ный участок (положительный столб) с плазмой может прерываться, если мощность накачки будет недостаточной.

При моделировании параллельного колебательного контура (рис. 7) было получено пространственное распределение электромагнитного поля, созданного колебательным контуром. Из этого распределения видно, что поле неоднородно (рис. 8), и на фото эксперимента (рис. 9), ионизирован не весь разрядный участок.

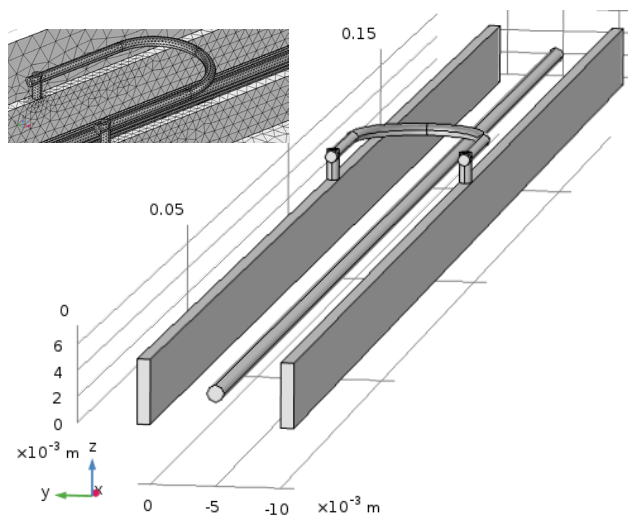


Рис. 7. Внешний вид модели

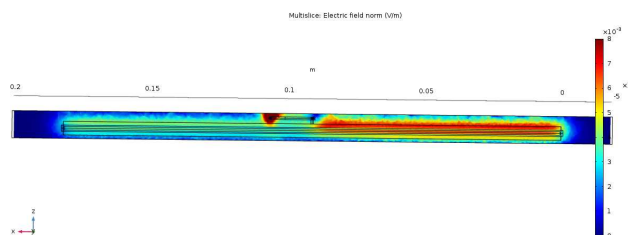


Рис. 8. Пространственное распределение электромагнитного поля в разрядной камере

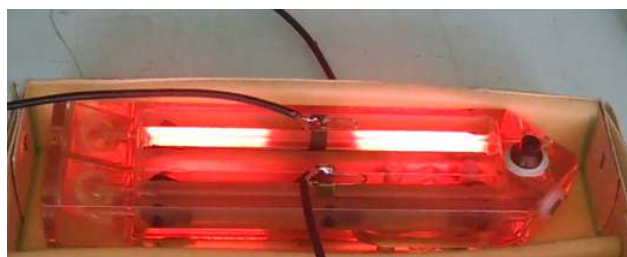


Рис. 8. Фото эксперимента: ионизация при малой мощности

ВЫВОДЫ

Таким образом показано, что параметры накачки активных сред в случае использования ВЧ разряда очень зависят от размеров газоразрядной среды. Поэтому для каждого отдельного капилляра с активной средой нужно рассчитывать параметры колеба-

тельной системы для получения наибольшей эффективности КПД.

Также для ВЧ разряда определена резонансная частота параллельного колебательного контура $f_0 = 213,94 \cdot 10^6$ Гц, которая является критическим фактором при использовании ВЧ разряда для данного колебательного контура. Показано, что при малой мощности внешнего сигнала разрядный объем (положительный столб) с плазмой может прерываться (поле неоднородно), это видно из результатов моделирования, и на фото эксперимента, ионизировано не весь разрядный объем.

Получено распределение электромагнитного поля в колебательном контуре. Этот метод накачки газовых активных сред может быть модифицирован, имея недостаток, который невозможно в полной мере учесть в силу сложности расчетов. Среда между обкладками конденсатора, а именно стекло и газ, имеют диэлектрическую проницаемость отличную от 1, а для газов существует также зависимость от температуры. Используя явление угасающих колебаний можно рассчитать действительную резонансную частоту, чтобы повысить КПД.

Литература

- [1] *Рохлин Г. Н.* Разрядные источники света. – 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 720 с.
- [2] Плазменные и газовые лазеры / А. М. Бойченко и др. Томск: – STT, 2017. 316 с.
- [3] *Гудзенко Л. И., Яковленко С. И.* Плазменные лазеры. Москва: Атомиздат, 1978. 256 с.
- [4] Источники и приемники излучения: учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Польшиков. СПб: Политехника, 1991. 240 с.
- [5] *Born M., Markus T.* Research on modern gas discharge light sources. Lect. Notes Phys. – Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – P. 399–423.
- [6] *J. Bogaert*, “Light Emitting Plasma,” 3e Bachelor podiumtechnieken, Erasmushogeschool – Departement RITS Brussel, 2013. – P. 55.
- [7] *Gutzeit E. M.* Electrodeless light sources employing high-frequency and microwave electromagnetic energy. Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 48, No. 1, 2003, pp. 1–30.
- [8] *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда: учеб. руководство: для вузов. Москва: Наука, 1992. 536 с.
- [9] *Fridman A.* Plasma chemistry. New York: Cambridge University Press, 2008. 978 p.
- [10] *Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А.* Высоко-частотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. М.: Изд. МФТИ: Наука Физ. мат.-лит, 1995. 320 с.
- [11] *Churyumov Gennadiy and Tetyana Frolova*, “Chapter 5. Microwave Energy and Light Energy Transformation: Methods, Schemes and Designs,” in Emerging Microwave Technologies in Industrial, Agricultural, Medical and Food Processing / Book edited by: Kok Yeow You, Ed. Rijeka: InTech, 2018, pp. 75-91. DOI: 10.5772/intechopen.73755
- [12] *Кравченко Н. И.* Использование СВЧ-возбуждения гелий-неоновой плазмы в целях создания метрологического лазера / Н. И. Кравченко, С. В. Шрамченко //

Український метрологічний журнал. – 2010. – № 4. – С. 38–43.

- [13] Каренгин А. Г. Физика и техника низкотемпературной плазмы: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 129 с.
- [14] Березина Г. П. Особенности развития пучково-плазменного разряда в газе высокого давления и перспективы его использования / Г. П. Березина, В. С. Ус // Прикладная физика. – 2011. – №1. – С. 84–91.
- [15] Шустин Е. Г. Пучково-плазменный разряд в слабом магнитном поле как источник плазмы для плазмохимического реактора / Е. Г. Шустин, Н. В. Исаев, М. П. Тимирязева, В. П. Тараканов, Ю. В. Федоров // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (6). – 2008. – №4. – С. 169–173.
- [16] Байборodin Ю. В. Основы лазерной техники. Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1988. 383 р.
- [17] Javan A. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture / A. Javan, W. R. Bennett, D. R. Herriott // Physical Review Letters. – 1961. – Vol. 6, No. 3. – P. 106–110.
- [18] Smirnov B. M. Fundamentals of ionized gases: basic topics in plasma physics. John Wiley & Sons, 2012. 490 p.
- [19] Велихов Е. П. Физические явления в газоразрядной плазме: учеб. руководство / Е. П. Велихов, А. С. Ковалев, А. Т. Рахимов. – Москва: 1987. – 160 с.
- [20] Грановский В.Л., Сен Л.А., Голант В.Е. Электрический ток в газе: установившийся ток. Физматгиздатель, 1971. 543 с.
- [21] Звельто О. Принципы лазеров / пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. СПб: Издательство “Лань,” 2008. 720 с.
- [22] Иманкулов З. И. Исследование одночастотного режима генерации в мощном He-Ne лазере с ПСВЧР/ З. И. Иманкулов, М. М. Мириноятв // Журн. Прикладной Спектроскопии. –1997. – Т. 64, № 1. – с.116-118.
- [23] Муллер Я. Н. Использование поперечного СВЧ разряда для создания малогабаритного экономичного He-Ne лазера / Я. Н. Муллер, В. М. Геллер, В. А. Хрусталеv // "Квантовая электроника". – 1979, – Т. 6, № 10. – С. 2224–2226.
- [24] Муллер Я. Н. Использование СВЧ газового разряда в оптических квантовых генераторах // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1979. – Т. 22, № 10. – С. 55–67.
- [25] Расулова Д. М. Исследование характеристики He-Ne лазера работающего на разряде ПСВЧ и постоянного тока / Д. М. Расулова // Конференция посвященная 80-летию академика М. С. Саидова, г. Ташкент, 24–25 ноября 2010 г. С. 428–429.

Поступила в редколлегию 14.01.2019



Фролова Татьяна Ивановна, канд. физ.- мат. наук., доцент кафедры физических основ электронной техники, ведущий научный сотрудник Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов – вакуумные микроволновые устройства и приборы; газоразрядные источники излучения; разработка 2D и 3D математических и компьютерных моделей электронно-волновых и плазменных процессов.



Васько Константин Александрович, аспирант университета г. Лимож (Франция). Область научных интересов – математическое моделирование физических процессов и объектов, физика плазмы, лазерная техника.

УДК 533.9...15

Фролова Т.І. **ВЧ збудження плазмових джерел оптичного випромінювання** / Т.І. Фролова, К. О. Васько // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2019. – Том 18, № 1, 2. – С. 66–72.

В роботі розглянуто механізм збудження газового розряду для отримання газорозрядної низькотемпературної плазми (НП), а також її основні елементарні процеси, які є визначальними для створення інверсної населеності робочих рівнів (гелій-неонової плазми). Проаналізовано особливості способів збудження НП у різних частотних діапазонах і показано їхні переваги та недоліки. Проведено моделювання високочастотного (ВЧ) розряду в розрядній області. Показано вплив вихідної потужності зовнішнього сигналу на збудження і підтримку стабільної генерації оптичного випромінювання. Результати підтверджені експериментальними дослідженнями. Отримані результати становлять інтерес для розробників оптоелектронних приладів, робота яких заснована на застосуванні гелій-неонових лазерів.

Ключові слова: низькотемпературна плазма, джерело оптичного випромінювання, ВЧ-розряд, НВЧ-розряд, розряд постійного струму (РПС), гелій-неонова плазма.

Л. 08. Бібліогр.: 25 найм.

UDC 533.9...15

Frolova Tetyana **HF excitation of plasma sources of optical radiation** / Tetyana Frolova, Kostiantyn Vasko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2019. – Vol. 18, № 1, 2. – P. 66–72.

The paper considers the mechanism of excitation of a gas discharge to create a gas-discharge low-temperature plasma (LTP), as well as its basic elementary processes that are crucial for creating an inverse population of working levels (helium-neon plasma). The features of the methods of LTP excitation in different frequency ranges are analyzed and their advantages and disadvantages are shown. A high-frequency (HF) discharge was simulated in the discharge region. Showed the effect of the output power of the external signal on the excitation and maintaining a stable generation of optical radiation. The results are confirmed by experimental studies. The results obtained are of interest to developers of optoelectronic devices whose work is based on the use of helium-neon lasers.

Keywords: low-temperature plasma, optical source, high-frequency discharge, microwave discharge, direct current (DC) discharge, helium-neon plasma.

Fig. 08. Ref.: 25 items.