

04;07

Особенности формирования импульсного индукционного разряда для накачки газоразрядных источников излучения

© А.И. Федоров

Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, Томск
E-mail: fedorov@asd.iao.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2009 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований импульсного индукционного поперечного разряда в зависимости от параметров активной газовой среды и разрядного контура возбуждения. Показано, что для создания импульсной индукционно связанной плазмы поперечного вихревого поля, возбуждающего газовой среды, оптимальными являются индукторы возбуждения с индуктивностями от 50 до 300 нН, в которые может передаваться до 30% энергии от LC-генератора накачки. Сделан вывод о том, что энергия, запасаемая в индукторе возбуждения, может эффективно использоваться на создание источников спонтанного или когерентного излучения.

PACS: 32.70.Fw, 52.80.Yr

Одной из актуальных проблем физики газовых разрядов является поиск новых способов возбуждения активных сред и создание новых источников спонтанного и когерентного излучения для современных прикладных задач. Эти способы возбуждения должны превосходить существующие по эффективности ввода энергии в активные среды, по качеству и выбору требуемого спектрального диапазона излучения. При этом они должны обеспечивать простоту конструктивного исполнения источников накачки для увеличения надежности их работы. В работах [1,2] была показана возможность получения непрерывной генерации на электронных переходах атомарных ионов аргона в зеленой области спектра при возбуждении продольным индукционным высокочастотным (ВЧ) разрядом трансформаторного типа [3]. В иностранной литературе используется для этого разряда термин (Transformer Coupled Toroidal Induction Discharges). Впервые в работе [4] сообщалось о возможности создания газоразрядных источников излучения с возбуждением

импульсным индукционным разрядом. Индукционный способ возбуждения основан на использовании явления электромагнитной индукции, который заключается в том, что через катушку–соленоид пропускается импульсный ток. Магнитное поле этого тока переменное, внутри соленоида индуцируется вихревое электрическое поле. Силовые линии его представляют собой замкнутые окружности, концентрические с витками соленоида. Это электрическое поле может зажигать и поддерживать импульсный разряд в газовых средах по аналогии с индукционным ВЧ-разрядом [5]. Для вихревого электрического поля в силу замкнутости силовых линий и отсутствия электродов нет проблем с контракцией разряда и износом электродов, а соответственно однородности и чистоте разряда. Что является главным преимуществом индукционного разряда перед емкостным поперечным разрядом. Под поперечным индукционным разрядом понимается электрический вихревой разряд, в котором вихревой ток протекает в направлении, перпендикулярном оптической оси излучения. В работе [6] был экспериментально реализован метод возбуждения газовых сред импульсным поперечным индукционным разрядом. Авторами работ [6–8] впервые была показана возможность получения лазерной генерации от УФ- до ИК-области спектра. Открытыми остаются вопросы физики импульсной индукционно связанной плазмы, используемой для возбуждения газовых сред, измерений ее параметров, а соответственно эффективности данного метода возбуждения для получения спонтанного или когерентного излучения.

В работе рассмотрены особенности зажигания импульсного индукционного поперечного разряда в азоте и инертных газах при давлении от 0.1 до 380 Торг в зависимости от параметров LC -генератора накачки и типов индукторов возбуждения. В настоящее время успешно используются LCR -цепи с сосредоточенными параметрами для получения сильных импульсных магнитных полей [9]. Они обеспечивают получение минимальных длительностей импульсов возбуждения $\sim 10 \mu s$. В нашем случае необходимы импульсные индукционные разряды длительностью порядка десятков наносекунд с высокими амплитудами разрядного тока и напряжения [10]. Это новая и технически сложная задача по получению сильных магнитных полей наносекундного диапазона. Можно использовать колебательный контур в виде LCR -цепи с распределенными параметрами [11,12].

На рис. 1 приведена электрическая схема системы накачки газовых сред LC -генератором с индуктором L , обеспечивающим импульсный индукционный поперечный разряд. Индуктор представлял

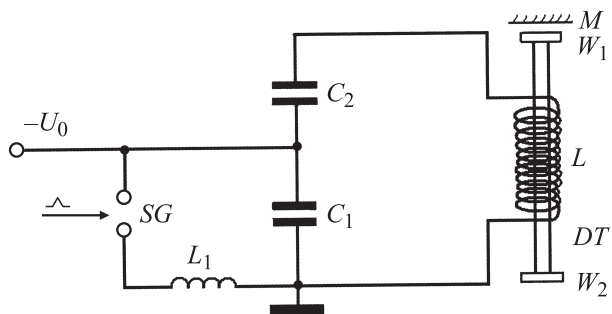


Рис. 1. Электрическая схема системы накачки газовых сред импульсным индукционным поперечным разрядом. *SG* — стандартный искровой разрядник РУ-62, $C_1 = 2.6\text{--}26\text{ нФ}$, $C_2 = 26\text{--}40\text{ нФ}$. *DT* — разрядная трубка, *L* — индуктор.

собой соленоид длиной 15–20 см. Он состоял из набора отдельных соленоидов, выполненных в виде секций, соединенных параллельно и расположенных вдоль кварцевой трубки, в которую напускались исследуемые газы. Каждая из секций имела количество витков от 3 до 7, намотанных изолированным многожильным проводом сечением 3 мм^2 или медной шиной сечением 5 мм^2 . Индукционные разряды возбуждались в трубках с внутренним диаметром от 1 до 2 см и общей активной длиной 20–30 см. По торцам трубки располагались юстировочные узлы с плоскопараллельными пластинами W_1 и W_2 из кварца, которые использовались в качестве герметизирующих окон и элементов оптического резонатора. С одной стороны трубки располагалось плоское диэлектрическое зеркало *M*. В экспериментах исследовались интенсивность и длительность спонтанного излучения индукционного разряда, а также его энергетические характеристики. Нами рассматривалось три режима работы *LC*-генератора накачки: 1 — $C_1 \ll C_2$; 2 — $C_1 = C_2/2$; 3 — $C_1 = C_2$ при условии $L_1 \ll L$ в зависимости от типа индуктора возбуждения и его индуктивности. Энергия, запасаемая в емкостном накопителе, изменялась от 1.5 до 3 Дж. Длительность импульсов накачки изменялась от 30 до 60 нс при частоте их повторения до 5 Гц. В первом случае ударная емкость (C_{sh}) генератора накачки соответствовала 2.4 нФ. Нами измерялись временные характеристики напряжения и тока на индукторе $L = 50\text{ нГн}$, а также интенсивность спонтанного излучения в азоте, которая оказалась более

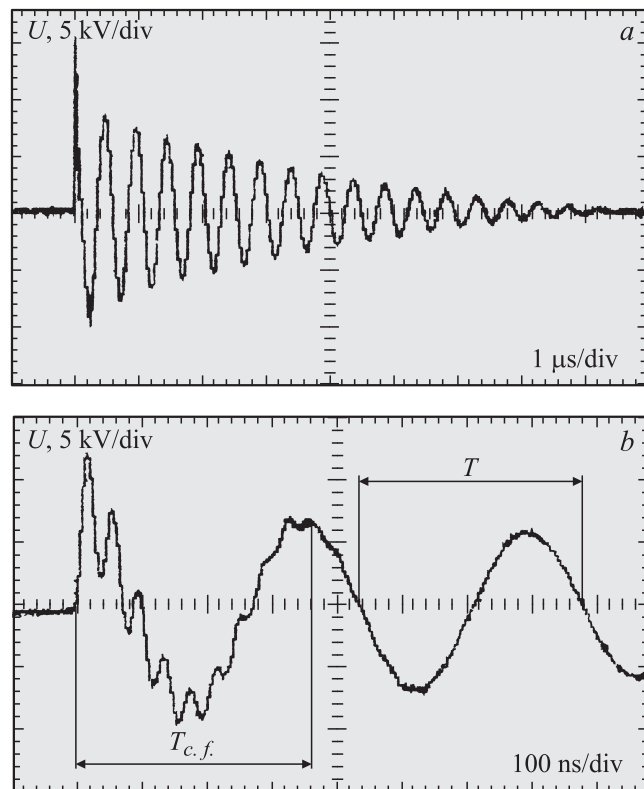


Рис. 2. Осциллограммы напряжения холостого хода на индукторе $L = 50 \text{ nH}$ при $U_0 = 10 \text{ kV}$ в азоте при давлении 30 Torr (a) и для режима спонтанного излучения при давлении 1 Torr (b).

чем в 2 раза выше по сравнению с емкостным поперечным разрядом возбуждения. Нас интересовали времена нарастания напряжения и тока на индукторе, которые влияли на создаваемое переменное магнитное поле, а соответственно на вихревое поле индукционного поперечного разряда.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на индукторе при зарядном напряжении $U_0 = 10 \text{ kV}$ в азоте для режима холостого хода (a)

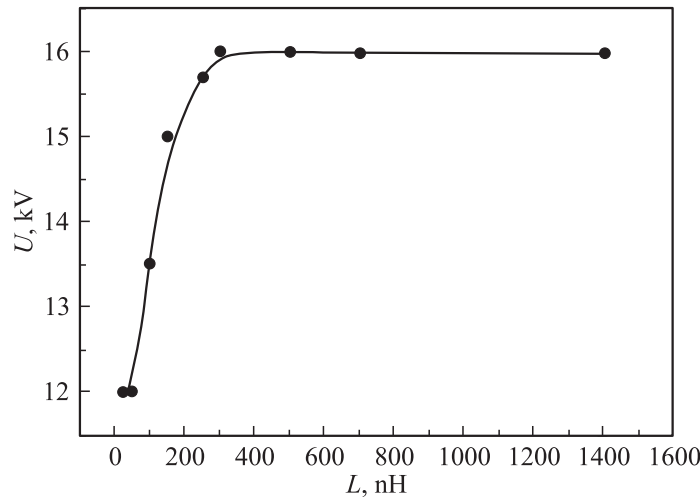


Рис. 3. Зависимость напряжения пробоя на индукторе возбуждения от величины его индуктивности в азоте при давлении 1 Торг для $C_{sh} = 2.4$ нФ и $U_0 = 10$ кВ.

и для режима спонтанного излучения (*b*). Режим спонтанного излучения наблюдался при давлениях ≤ 3 Торг, при этом с уменьшением давления интенсивность излучения возрастала. Время нарастания напряжения пробоя и тока разряда равнялось 20 и 10 нс соответственно. При этом время затухания напряжения холостого хода соответствовало $5 \mu\text{s}$, а спонтанного излучения $2.5 \mu\text{s}$. Это указывало на то, что эффективность вложения энергии в активную среду в два раза выше для режима спонтанного излучения, а значит наиболее оптимальные условия по созданию импульсной индукционно связанной плазмы в азоте низкого давления. На рис. 2, *b* показано время существования вихревого поля $T_{c.f.}$ в первые периоды колебаний контура возбуждения и T — период колебаний затухающего напряжения контура возбуждения LCR -цепи. Установлено, что с ростом индуктивности индуктора возрастал период колебаний контура возбуждения, а время существования вихревого поля оставалось постоянным ~ 360 нс. Это связано, видимо, с эффективностью создания переменного магнитного поля данным генератором накачки.

На рис. 3 приведена зависимость напряжения пробоя на индукторе возбуждения от величины его индуктивности для азота при давлении

1 Тот. Нами напряжение пробоя на индукторе условно „связано“ с напряжением пробоя вихревого поля, так как эту величину сложно измерять. С увеличением индуктивности индуктора с 25 до 300 нН наблюдался резкий рост напряжения пробоя на индукторе, а затем независимо от ее величины оно оставалось постоянным и равным 16 кВ. В наших условиях работы для эффективного создания импульсной индукционно связанной плазмы индуктивность индуктора возбуждения была оптимальной в пределах от 50 до 300 нН. Учитывая ударную емкость генератора накачки и напряжение пробоя на индукторе, можно определить энергию, вкладываемую в индуктор возбуждения. Она изменялась от 0.17 до 0.31 J для индукторов с $L = 50\text{--}300$ нН, а КПД индукторов изменялся от 12 до 22%. Нами рассматривалась возможность увеличения КПД индуктора за счет изменения ударной емкости генератора накачки. Для индуктора 50 нН были сняты в азоте аналогичные энергетические и спектральные характеристики разряда для $C_{sh} = 8.2$ нФ при $C_1 = 12$ нФ и $C_2 = 26$ нФ. Время нарастания напряжения пробоя на индукторе увеличивалось до 30 ns, а время нарастания тока до 15 ns. Энергия, запасаемая в индукторе, увеличивалась до 0.6 J и соответственно КПД индуктора возрастал до 31%. Время затухания напряжения холостого хода соответствовало $6\ \mu\text{s}$, а в режиме спонтанного излучения — $2\ \mu\text{s}$. Аналогичные характеристики были сняты для $C_{sh} = 13$ нФ при $C_1 = C_2 = 26$ нФ. Время нарастания напряжения пробоя на индукторе увеличивалось до 50 ns, а время нарастания тока оставалось тем же самым — 15 ns. Энергия, запасаемая в индукторе, увеличивалась до 0.85 J, а КПД индуктора возрастал до 33%. Время затухания напряжения холостого хода соответствовало $5\ \mu\text{s}$, а в режиме спонтанного излучения — $1.5\ \mu\text{s}$. Следовательно, КПД индуктора можно увеличивать с 12 до 33% за счет увеличения ударной емкости генератора накачки с 2.4 до 13 нФ, но при этом увеличиваются времена нарастания напряжения и тока на индукторе возбуждения. Наиболее оптимальной можно считать $C_{sh} = 8.2$ нФ, которая обеспечивала КПД индуктора $\sim 30\%$ со временами нарастания напряжения и тока 30 и 15 ns соответственно. Нами были проведены аналогичные исследования импульсной индукционно связанной плазмы в He, Ne, Xe и их смесях. Оказалось, что полученные результаты и характеристики индукторов возбуждения распространяются на другие активные газовые среды. При этом надо учитывать сорт газа и его рабочее давление.

Таким образом, КПД индуктора возбуждения зависит от величины его индуктивности, ударной емкости генератора накачки, выбора ра-

бочего газа и его давления. Для создания импульсного индукционного поперечного разряда возбуждения оптимальными являются индукторы с индуктивностями от 50 до 300 нН. В индуктор возбуждения может передаваться до 30% энергии от энергии, запасаемой в генераторе накачки. Эта энергия используется на создание импульсной индукционно связанной плазмы поперечного разряда, которая может быть эффективным источником спонтанного или когерентного излучения.

Список литературы

- [1] *Bell W.E.* // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 7. P. 190.
- [2] *Goldborough J.P., Hodges E.B., Bell W.E.* // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 8. P. 137.
- [3] *Гольдфарб В.М., Донской А.В., Дресвин С.В.* и др. // ТВТ. 1979. Т. 17. № 4. С. 698.
- [4] *Мхитарян В.М.* // Лазер. информ. 2004. № 15–16. С. 18.
- [5] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [6] *Ражев А.М., Мхитарян В.М., Чуркин Д.С.* // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. В. 5. С. 290.
- [7] *Ражев А.М., Чуркин Д.С.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. В. 6. С. 479.
- [8] *Razhev A.M., Churkin D.S.* // Optics Communications. 2009. V. 282. P. 1354.
- [9] *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
- [10] *Федоров А.И.* // Тез. докл. симпозиума „Лазеры на парах металлов.“. Ростов-на-Дону, 2006. С. 12.
- [11] *Федоров А.И.* // Тез. докл. симпозиума „Лазеры на парах металлов“. Ростов-на-Дону, 2008. С. 91.
- [12] *Федоров А.И.* // Тез. докл. III Всероссийской конференции „Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине“. Новосибирск, 2009. С. 173.