

04;07

Возможности создания импульсного индукционно-емкостного продольного разряда

© А.И. Федоров

Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, Томск
E-mail: fedorov@asd.iao.ru*Поступило в Редакцию 22 июля 2009 г.*

Показано, что за счет импульсной индукционно связанной плазмы поперечного вихревого разряда в газовых средах возможно формирование двух режимов получения продольного разряда возбуждения. Сделан вывод о том, что формирование импульсного индукционно-емкостного продольного разряда может осуществляться как за счет магнитного, так и электрического поля.

PACS: 32.70.Fw; 52.80.Yr

Для физики газовых лазеров одной из основных проблем является поиск новых способов возбуждения активных сред для создания эффективных газоразрядных источников излучения для ряда прикладных. Впервые в работах [1,2] была показана возможность получения генерации на электронных переходах атомарных ионов аргона при возбуждении продольным индукционным высокочастотным разрядом трансформаторного типа. В работе [3] сообщалось о возможности создания импульсных индукционных газоразрядных источников излучения. В ней рассматривались условия их возбуждения как поперечным, так и продольным индукционным разрядом трансформаторного типа. Индукционный способ возбуждения основан на использовании явления электромагнитной индукции [4]. В данном способе возбуждения отсутствуют электроды, что является одним из основных преимуществ перед емкостным способом возбуждения. Под поперечным индукционным разрядом понимается электрический вихревой разряд, в котором вихревой ток протекает в направлении, перпендикулярном оптической оси излучения, а для продольного разряда — в направлении, параллельном ей. Авторами работ [5–7] впервые была показана возможность получения лазерного излучения от УФ- до ИК-области спектра за

счет импульсного поперечного индукционного разряда возбуждения. Авторы работы [8] исследовали предельные параметры азотного УФ-лазера, возбуждаемого емкостным поперечным разрядом. В чистом азоте при оптимальном давлении 78 Торг в активном объеме 0.41 и вкладываемой энергии 23 J была получена энергия излучения 4 mJ, которой соответствовал удельный энергоотъем $0.1 \text{ J} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ат}^{-1}$. С добавками SF₆ в азот при давлении 105 Торг им была получена энергия излучения 40 mJ с удельным энергоотъемом $0.7 \text{ J} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ат}^{-1}$. Перспективность использования индукционного метода возбуждения для азотного лазера была хорошо продемонстрирована в работе [6]. Авторами была получена энергия излучения за импульс 2.4 mJ для чистого азота при давлении 0.6 Торг в активном объеме 0.51 и вкладываемой энергии 25 J, которой соответствовал удельный энергоотъем $6 \text{ J} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ат}^{-1}$. При этом рабочее давление азота было в 130 раз ниже, чем в работе [8]. Это говорит о высокой потенциальной возможности индукционного способа возбуждения газовых лазеров. Поэтому открытыми остаются вопросы получения импульсной индукционно связанной плазмы и ее эффективного применения для накачки газоразрядных источников излучения. Нами в работе [9] исследовался объемный импульсный индукционный разряд в азоте, инертных газах и их смесях. Были показаны особенности возбуждения и получения импульсного поперечного разряда в зависимости от параметров индукторов возбуждения. В работах [10,11] нами рассматривалось влияние параметров емкостного генератора накачки на плазму импульсного индукционного поперечного разряда возбуждения. Кроме поперечного индукционного разряда, нами впервые наблюдались режимы получения импульсного продольного разряда, которые представлены в данной работе [9,11].

На рис. 1 приведена электрическая схема системы возбуждения импульсных индукционных поперечных и продольных разрядов в газовых средах. LC-генератор накачки работал с частотой повторения импульсов до 5 Hz. Он был подключен к индуктору L , который представлял собой соленоид длиной 15–20 см. Он состоял из набора отдельных соленоидов, выполненных в виде секций, соединенных параллельно и расположенных вдоль кварцевой трубки диаметром 2 см и активной длиной 20–30 см, в которую напускались исследуемые газы. Каждая из секций имела количество витков от 3 до 7, намотанных изолированным проводом сечением до 3 мм². По торцам трубки располагались юстировочные узлы E_1 и E_2 с плоскопараллельными пластинами W_1 и

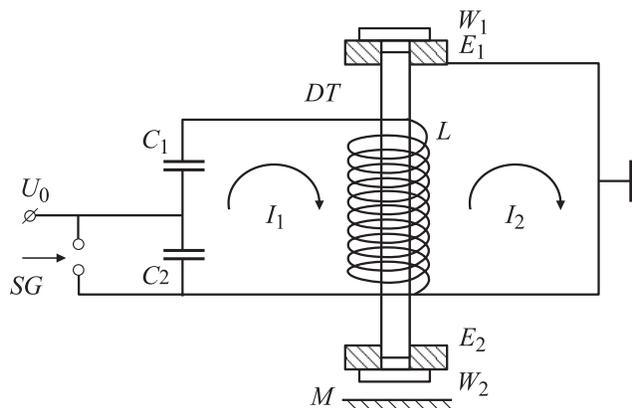


Рис. 1. Электрическая схема системы возбуждения импульсных индукционных поперечных и продольных разрядов в газовых средах: SG — стандартный искровой разрядник РУ-62, $C_1 = 26\text{--}40\text{ нФ}$, $C_2 = 2.6\text{--}26\text{ нФ}$, DT — разрядная трубка, L — индуктор, E_1 и E_2 — юстировочные узлы с элементами электродов полого катода.

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 использовались юстировочные узлы двух типов: металлические и диэлектрические. Металлический юстировочный узел одновременно мог являться электродом в случае его заземления. В этом случае схема имела два разрядных контура. В первый контур с разрядным током I_1 входили LC -генератор и индуктор L . Во второй контур с разрядным током I_2 входили индуктор L , обратный заземленный токопровод, электрод юстировочного узла, газовая рабочая среда, играющая роль нагрузки между электродом и индуктором, которая замыкалась на плазму вихревого поперечного разряда, создаваемого этим индуктором. Контур два можно также условно назвать „виртуальным контуром преобразования“ вихревого поперечного разряда в продольный разряд за счет самоиндукции переменного магнитного поля индуктора L . Известно, что два соленоида с током взаимодействуют друг с другом, поскольку каждый из них находится в магнитном поле другого. При

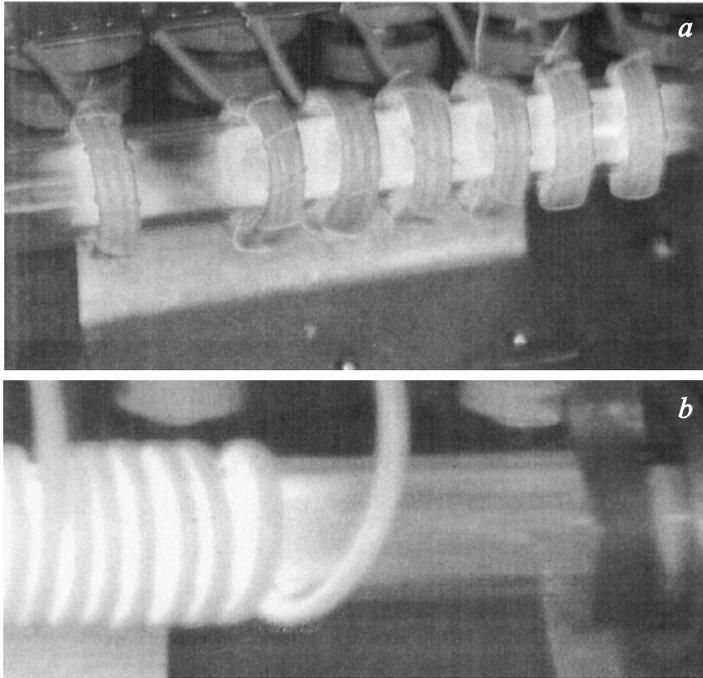


Рис. 2. Импульсный индукционный поперечно-продольный разряд в газовой смеси $\text{He}:\text{Xe} = 10:1$ при давлении 66 Торг с секционным индуктором возбуждения с $L = 70 \text{ нН}$ (а) и фрагмент импульсного индукционного поперечно-продольного разряда в Ne при давлении 30 Торг для сплошного индуктора с $L = 600 \text{ нН}$ (б).

этом они притягиваются, если соленоиды имеют параллельное включение соседним направлением разрядного тока. Используя соленоиды в виде секций с плотной намоткой, и, меняя расстояние между ними, нами было обнаружено, что секционная плазма одного вихревого поля начинает взаимодействовать с плазмой другого вихревого поля, они притягиваются, превращаясь в единый продольный разряд.

На рис. 2, а показан один из вариантов секционного индуктора с расстояниями между секциями 2 см и одной секцией с расстоянием

4 см от остальных секций. В этом случае вихревой разряд в смеси $\text{He}:\text{Ne}=10:1$ при давлении 66 Торр взаимодействовал между собой, переходя в продольный разряд. При расстояниях более чем ширина секции соленоида взаимодействие плазмы наблюдалось слабое, что наглядно демонстрирует рис. 2, *a*. Это явление нами было связано с взаимодействием вихревых токов поперечного разряда и переменного магнитного поля, которое направлено вдоль оптической оси излучения разряда. Данный тип разряда с индукторами в виде разделенных секций можно применять как для локального возбуждения газовых компонент (смесей), так и для создания продольного разряда большой протяженности. Данный тип разряда был получен с диэлектрическими и металлическими юстировочными узлами. В случае, когда индуктор выполнен в виде единого соленоида, состоящего из параллельных секций, а юстировочные узлы были изготовлены из металла и один из них соединялся с заземленной обмоткой индуктора L , нами впервые в работах [10,11] наблюдался не только поперечный вихревой разряд, но и продольный разряд, который замыкался на электрод E_1 юстировочного узла.

На рис. 2, *b* показан фрагмент формирования плазмы продольного разряда для сплошного индуктора в Ne при давлении 30 Торр. Параметры разряда зависели от величины индуктивности индуктора и выбора компонент активной газовой среды. В этом случае виток замкнутого кольца магнитопровода выполнял рабочий газ, плазма вихревого разряда и электрод юстировочного узла E_1 . Этот разряд можно отнести к продольному разряду трансформаторного типа. Продольный разряд отсутствовал, когда юстировочные узлы были выполнены из диэлектрика. Известно, что в технике генерирования мощных импульсов используются линейные импульсные трансформаторы (ЛИТ), которые состоят из N одновитковых трансформаторов с единой вторичной обмоткой [12,13]. В качестве вторичной обмотки используется металлический стержень, на который надеты тороидальные индукторы с первичной обмоткой. В нашем случае схема возбуждения, представленная на рис. 1, условно соответствует ЛИТ, где первичные обмотки — это параллельные соленоиды, а единой вторичной обмоткой является вихревая плазма, создаваемая индуктором L , на которую „надеты“ соленоиды. Нагрузкой является невозбужденный рабочий газ между индуктором и полым электродом юстировочного узла E_1 , которые соединены между собой обратным токопроводом. С другой стороны, продольный разряд можно

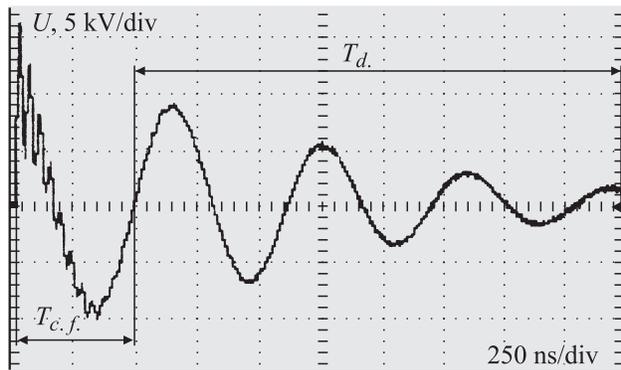


Рис. 3. Оциллограмма напряжения на индукторе $L = 300$ нН при $U_0 = 10$ кВ в Ne для давления 30 Торг в продольном разряде в режиме спонтанного излучения.

считать индукционно-емкостным продольным разрядом с полым катодом. В нем анодом является плазма поперечного вихревого разряда, а вторым емкостным электродом является полый катод юстировочного узла, заземленного и соединенного с индуктором L . В работе [11] нами было показано, что для создания импульсной индукционно связанной плазмы поперечного вихревого разряда, возбуждающего газовой среды, оптимальными являются индукторы с индуктивностями до 300 нН. При этом в них запасалось до 30% энергии от энергии LC-генератора накачки. Часть этой энергии может тратиться на поддержание индукционно-емкостного разряда трансформаторного типа.

На рис. 3 приведена оциллограмма напряжения на индукторе L в Ne для режима спонтанного излучения при зарядном напряжении $U_0 = 10$ кВ. Время существования вихревого разряда ($T_{c.f.}$) составляло 300–500 нс, а время существования и затухающего продольного разряда трансформаторного типа (T_d) составляло 2.5–5 мкс. Они зависели от выбора рабочего газа (смеси), давления и величины индуктивности индуктора возбуждения. С уменьшением длительности и ростом амплитуды разрядного тока индуктора возбуждения возрастала интенсивность продольного разряда.

Таким образом, нами была показана возможность получения продольных разрядов в газовых средах за счет секционного исполнения

индуктора возбуждения или при наличии дополнительного замкнутого витка токопровода. Найдены условия, при которых плазма вихревого поля может выполнять функцию одного из электродов емкостного разрядного промежутка, а функцию второго электрода элемент юстировочного узла кварцевой трубки с активной средой. Нами впервые наблюдалось в импульсном режиме „виртуальное“ преобразование переменного магнитного поля в электрическое, которое может найти широкое применение как для создания источников излучения, так и для передачи энергии на расстояния.

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] *Мхитарян В.М.* // Лазер-Информ. 2004. № 15–16. С. 18.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [5] *Ражев А.М., Мхитарян В.М., Чуркин Д.С.* // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. В. 5. С. 290.
- [6] *Ражев А.М., Чуркин Д.С.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. В. 6. С. 479.
- [7] *Razhev A.M., Churkin D.S.* // Optics Communications. 2009. V. 282. P. 1354.
- [8] *Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И.* и др. // Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 2. С. 161.
- [9] *Федоров А.И.* // Тез. докл. симпозиума „Лазеры на парах металлов“. Ростов-на-Дону, 2006. С. 12.
- [10] *Федоров А.И.* // Тез. докл. симпозиума „Лазеры на парах металлов“. Ростов-на-Дону, 2008. С. 91.
- [11] *Федоров А.И.* // Тез. докл. III Всероссийской конференции „Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине“. Новосибирск, 2009. С. 173.
- [12] *Mesyats G.A.* // Proc. II IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Lubbock. 1997. P. 9–16.
- [13] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.