

О природе фантомных токов в активной среде лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов

Н.А.Юдин, В.Б.Суханов, Ф.А.Губарев, Г.С.Евтушенко

Изучена зависимость амплитуды и длительности токов, протекающих в разрядном контуре лазера, от параметров активной среды и условий возбуждения. Показано, что фантомный ток обусловлен спецификой зарядки емкостной составляющей импеданса газоразрядной трубки (ГРТ) лазера. При этом ток, протекающий через тиратрон, является током зарядки емкостных составляющих импеданса разрядного контура лазера. Это обуславливает существенное различие токов, протекающих через тиратрон и ГРТ. Во время существования фантомного тока активная среда находится под равным потенциалом, что не позволяет предымпulseльным электронам в плазме набрать энергию, достаточную для осуществления неупругих соударений в активной среде.

Ключевые слова: лазер на парах меди, фантомный ток.

1. Введение

Активная среда импульсно-периодических лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов характеризуется высокой предымпulseльной концентрацией электронов n_e . Полагается, что фантомные токи, протекающие через активную среду, являются индикатором n_e в этих лазерах [1, 2]. Фантомный ток наблюдается на начальной стадии развития разряда и согласно [1] интерпретируется как ток, созданный предымпulseльными электронами, которые не набрали достаточной для осуществления неупругих соударений в активной среде энергии. При этом амплитуда фантомного тока может достигать 60% от максимальной силы тока, протекающего через активную среду лазера, что не позволяет сделать однозначного вывода о природе возникновения фантомных токов.

В данной работе с целью выяснения природы возникновения фантомных токов экспериментально изучались зависимости амплитуды и длительности токов, протекающих в разрядном контуре лазера, от параметров активной среды и условий ее возбуждения.

2. Моделирование процессов в разрядном контуре лазера

Начальная стадия развития разряда, так же как и процессы на электродах и в приэлектродных областях газоразрядной трубки (ГРТ) в импульсно-периодических лазерах на самоограниченных переходах атомов металлов,

практически не изучались, что затрудняет моделирование кинетики процессов в активной среде этих лазеров. Активная среда лазера при моделировании задается, как правило, в виде нагрузки с сосредоточенными параметрами. Последнюю представляют в виде двух последовательно соединенных элементов, определяющих активную и индуктивную составляющие импеданса ГРТ; параллельно им подключена обостряющая емкость [2, 3]. Конструктивно ГРТ лазера состоит из разрядного канала, на торцах которого в холодных буферных зонах расположены электроды [2–4]. ГРТ лазера также имеет собственную емкость относительно земли, что необходимо учитывать при моделировании процессов в разрядном контуре. На рис.1 представлена электрическая схема лазера, на которой штриховой линией выделена эквивалентная схема ГРТ. Активная, емкостная и индуктивная составляющие импеданса ГРТ представлены в виде последовательно соединенных $R-L-C$ -цепочек, где L_1 и L_3 – индуктивности тоководов ГРТ; R_2, L_2, C_2 – активная, индуктивная и емкостная составляющие импеданса активной среды ГРТ соответственно; R_1, R_3, C_1, C_3 – активная и емкостная составляющие электродных узлов относительно активной среды соответственно. Зарядка накопительного конденсатора C в лазере осуществляется от высоковольтного выпрямителя (ВВ) через зарядный дроссель L , диод D и шунтирующую индуктивность L_{sh} . После этого на сетку тиратрона T подается запускающий

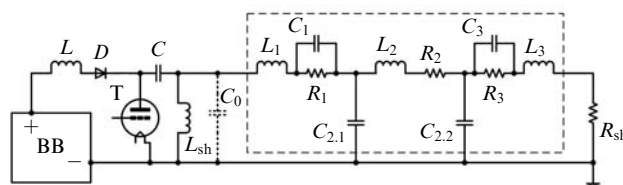


Рис.1. Схема генератора накачки лазера (штриховой линией выделена эквивалентная схема ГРТ):

ВВ – высоковольтный выпрямитель; L и D – зарядные дроссель и диод соответственно; C – накопительный конденсатор; C_0 – обостряющая емкость; T – тиратрон; L_{sh} – шунтирующая индуктивность; R_{sh} – измерительный шунт (пояс Роговского).

Н.А.Юдин. Западно-Сибирский филиал Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; e-mail: yudin@tic.tsu.ru

В.Б.Суханов. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 1

Ф.А.Губарев, Г.С.Евтушенко. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 1; Томский политехнический университет, 634050 Томск, просп. Ленина, 30

Поступила в редакцию 16 апреля 2007 г.

импульс, и накопительный конденсатор подключается к электродам ГРТ.

Для экспериментального исследования процессов в разрядном контуре лазера (рис.1) следует установить основные параметры, контроль которых необходим для однозначной трактовки наблюдаемого процесса. Для этого нужно хотя бы на качественном уровне представлять картину процессов, протекающих в разрядном контуре лазера. С этой целью мы воспользовались компьютерными программами, которые используются для анализа переходных процессов в электротехнических цепях. Начальное состояние активных составляющих импеданса ГРТ в расчетах задавалось как R_0 – предимпульсное сопротивление, а конечное состояние активных составляющих – как R_m , среднее сопротивление плазмы. Последнее определяется как сопротивление, на котором выделяется энергия, эквивалентная энергии, вводимой в активную среду за импульс возбуждения [5, 6]. Изменение сопротивления плазмы от R_0 к R_m в расчетах осуществлялось с определенной задержкой, величина которой варьировалась в процессе моделирования.

На рис.2 приведены результаты моделирования (напряжение на ГРТ и токи, протекающие через R_{sh} и тиратрон) при следующих начальных условиях; напряжение на ВВ 6 кВ, частота следования импульсов возбуждения $f \sim 17$ кГц, емкость накопительного конденсатора 1300 пФ. Приведенные на рис.2 зависимости указывают на то, что судить о процессах, протекающих в активной среде импульсно-периодических лазеров, можно, если одновременно контролировать токи, протекающие через ГРТ и тиратрон, напряжение на ГРТ и характеристики лазерного излучения. В данном случае при разряде накопительного конденсатора осуществляется зарядка емкостных составляющих импеданса ГРТ. Поскольку в начальный момент емкости C_2 и C_3 включены параллельно, но последовательно с емкостью C_1 , то последняя заряжается до большего напряжения. Поэтому раньше по времени происходит пробой промежутка катод – активная среда. Энергия, запасенная в емкости C_1 , поддерживает разряд в данном промежутке, его сопротивление резко падает и шунтирует емкость C_1 . Далее подобный процесс происходит на промежутке активная среда – анод. До этого момента через активную среду протекает ток зарядки емкостей C_2 и C_3 , который фиксируется как фантомный ток и является, по сути, током смещения заряда.

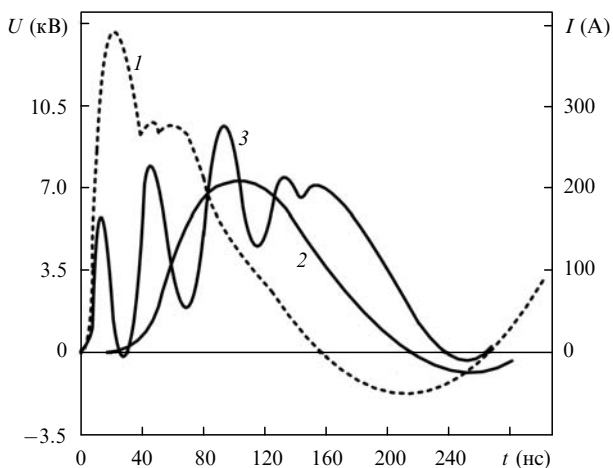


Рис.2. Результат моделирования импульса напряжения на ГРТ (1) и импульсы тока, протекающие через ГРТ (2) и тиратрон (3).

При этом все участки активной среды должны находиться под одним потенциалом, в связи с чем предимпульсные электроны не могут набрать энергию, достаточную для осуществления неупругих соударений в активной среде. Поскольку зарядный ток емкостей C_1 и C_2 не протекает в данном случае через измерительный шунт R_{sh} , то изначально наблюдается существенное различие токов, протекающих через тиратрон и активную среду.

Полученные в результате моделирования зависимости изменения токов через тиратрон и ГРТ показали, что по абсолютному значению ток со стороны катода ГРТ может превышать ток, протекающий через активную среду. Следует отметить, что собственная емкость C_2 активной среды ГРТ является распределенной емкостью, обозначенной на эквивалентной схеме как $C_{2.1}$ и $C_{2.2}$. Зарядка этой емкости может осуществляться как со стороны катода ГРТ (рассмотренный выше случай – первый режим работы), так и со стороны анода ГРТ (второй режим работы). В первом случае зарядка емкости C_2 осуществляется током смещения заряда вдоль активной среды от катода к аноду ГРТ, а во втором – током зарядки емкостной составляющей импеданса ГРТ от анода к катоду. При этом, как показало моделирование данного процесса, токи через измерительный шунт и тиратрон должны протекать одновременно, но различаться по амплитуде, причем амплитуда тока через измерительный шунт должна превышать амплитуду тока через тиратрон. На первый взгляд, это выглядит как нонсенс, поскольку тогда ток зарядки емкостной составляющей ГРТ должен был бы протекать по пути наибольшего сопротивления, но экспериментально это подтверждается и имеет физическое объяснение.

3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальное исследование зависимостей амплитуды и длительности фантомных токов от параметров активной среды и условий возбуждения проводилось с использованием $CuBr - Ne - H_2(HBr)$ -лазера, который по своим характеристикам сравним с $HuBrID$ -лазером [2, 7, 8]. Выбор данного лазера для исследований обусловлен тем, что $HuBrID$ - и $CuBr - Ne - H_2(HBr)$ -лазеры имеют более высокое предимпульсное сопротивление плазмы, чем Cu - и $CuBr$ -лазеры [2, 9]. Это позволяет реализовывать наибольшую длительность фантомных токов, что несколько упрощает проведение экспериментов.

Исследования проводились с ГРТ, диаметр разрядного канала которой составлял 58 мм, а длина разрядного промежутка (расстояние между электродами) была равна 105 см. Активная зона помещалась во внешний нагреватель, выполненный в виде прямоугольного металлического кожуха со слоем теплоизоляции и встроенным нагревательным элементом. Такая конструкция позволяла поддерживать температуру рабочего объема на оптимальном уровне (760–800 °С) независимо от условий накачки. Примерно 10 см разрядного промежутка с каждой стороны ГРТ находилось за пределами нагревателя. Расстояние между стенкой ГРТ и металлической частью кожуха составляло 60–90 мм. Равномерно по длине активной зоны располагались три контейнера с рабочим веществом $CuBr$, которые были вынесены из внешнего нагревателя и имели независимый нагрев. Рабочая температура контейнеров подбиралась по максимуму мощ-

ности генерации. Для введения HBr в активную среду в ГРТ находился контейнер с адсорбентом, насыщенным галогеноводородом (генератор HBr), который располагался со стороны анода ГРТ и имел отдельное устройство для регулирования температуры. Температура контейнера поддерживалась на уровне, соответствующем максимальной мощности генерации, т.е. оптимальной величине добавки HBr [8]. Исследования проводились при давлении буферного газа неона ~ 4 кПа, частоте следования импульсов возбуждения $f = 17$ кГц и емкости накопительного конденсатора 1300 пФ. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ1-1000/25. Напряжение на ГРТ измерялось с помощью безындуктивного омического делителя, а токи, протекающие через активную среду и тиратрон, – поясами Роговского и осциллографом Tektronix TDS-3032. Измерение обратного напряжения на аноде тиратрона осуществлялось статическим киловольтметром.

При изменении напряжения на ВВ от 4.0 до 6 кВ наблюдалось увеличение средней мощности генерации с 5 до 15 Вт (рис.3, кривая 4). Потребляемая мощность от ВВ изменялась при этом от 0.8 до 2.4 кВт. Максимальный КПД лазера $\sim 0.84\%$ реализовывался в области напряжений на выпрямителе $\sim 4.5 - 5.0$ кВ (кривая 5). Наблюдалось нелинейное изменение максимального значения амплитуды напряжения на ГРТ (рис.4, кривая 1) при практически линейном нарастании обратного напряжения на аноде тиратрона (кривая 2). Время нарастания напряжения на ГРТ до максимального значения изменялось с 24 до 80 нс (рис.3, кривая 1), и при этом наблюдалось запаздывание времени начала генерации (кривая 2).

На рис.5 и 6 представлены осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ, импульсов генерации и токов, протекающих через измерительный шунт ГРТ и тиратрон. Первый режим работы (рис.5) наблюдался при напряжении на ВВ до 5 кВ. При напряжении 5.5 кВ происходил переход от первого режима работы ко второму,

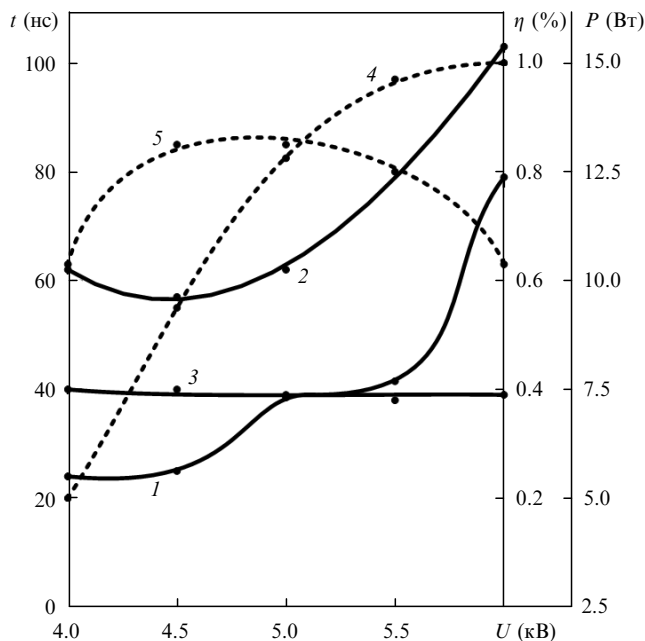


Рис.3. Зависимости времени нарастания напряжения на ГРТ (1), времени начала генерации (2), длительности импульса генерации по полувысоте (3), средней мощности генерации (4) и КПД лазера η (5) от напряжения на ВВ.

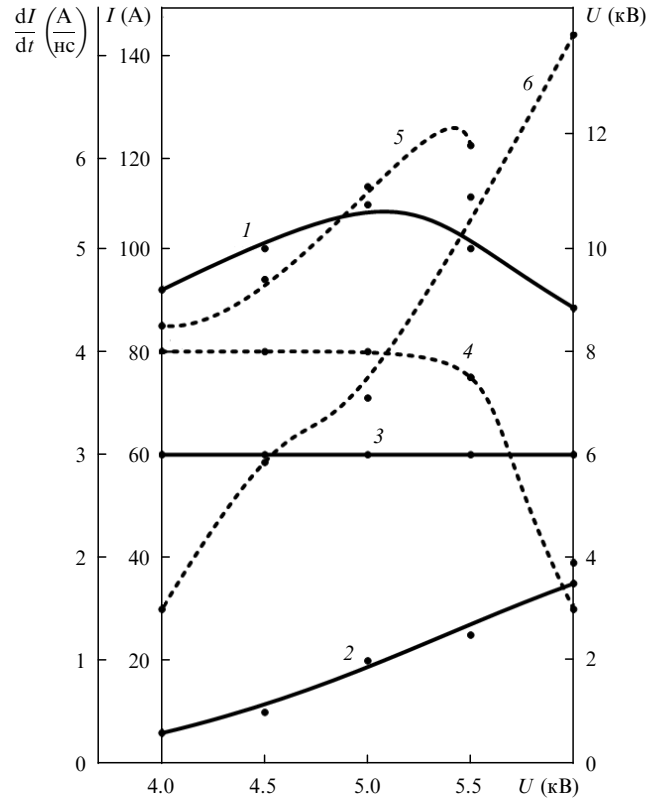


Рис.4. Зависимости максимального значения амплитуды напряжения на ГРТ (1), обратного напряжения на аноде тиратрона (2), напряжения на ГРТ, при котором начинается генерация (3), скорости нарастания тока в тиратроне (4), амплитуды тока зарядки емкостных составляющих импеданса разрядного контура (5) и амплитуды тока, протекающего через ГРТ к моменту начала генерации (6), от напряжения на ВВ.

а начиная с напряжения 6 кВ наблюдался второй режим работы (рис.6). Увеличение напряжения на ВВ свыше 6 кВ приводило к неустойчивой работе тиратрона в разрядном контуре лазера. При изменении напряжения на ВВ от 4.0 до 6.0 кВ наблюдалось незначительное сокращение длительности импульсов генерации по полувысоте (см. рис.3, кривая 3). При этом происходило более заметное изменение амплитуды и длительности импульсов генерации по основанию (рис.7).

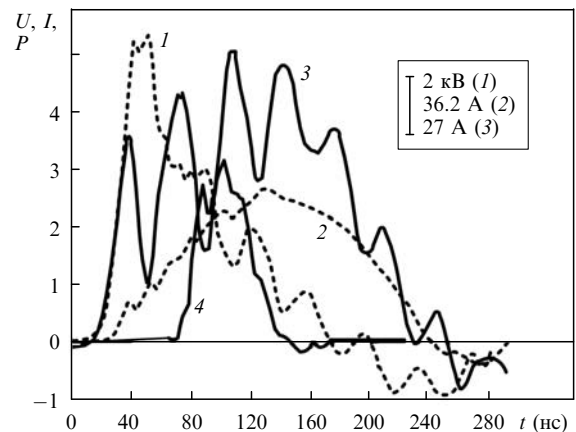


Рис.5. Осциллограммы импульса напряжения U на ГРТ (1), импульсов тока I , протекающего через ГРТ (2) и тиратрон (3), и импульса генерации P (4), соответствующие первому режиму работы (напряжение на выпрямителе 4.5 кВ).

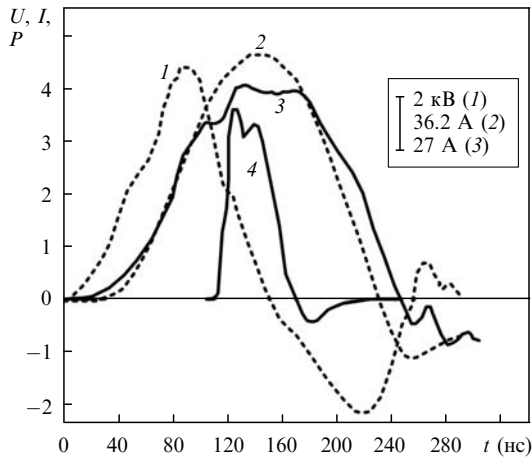


Рис.6. Осциллограммы импульса напряжения U на ГРТ (1), импульсов тока I , протекающего через ГРТ (2) и тиратрон (3), и импульса генерации P (4), соответствующие второму режиму работы (напряжение на выпрямителе 6.0 кВ).

4. Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что в начальный момент ток, протекающий через тиратрон в первом режиме работы, обусловлен зарядкой емкостной составляющей C_i импеданса ГРТ, которая определяется из эквивалентной схемы ГРТ (см. рис.1):

$$\frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3}. \tag{1}$$

С увеличением напряжения на ВВ с 4.0 до 6.0 кВ время зарядки C_i увеличивается (рис.3, кривая 1). При этом скорость нарастания тока остается неизменной и составляет ~ 4 А/нс (рис.4, кривая 4) до момента изменения режимов работы. Поскольку допустимая скорость нарастания тока для тиратрона ТГИ1-1000/25 составляет ~ 4 А/нс [10], можно заключить, что скорость и время зарядки C_i практически определяются тиратроном, а не параметрами разрядного контура лазера, что подтверждается наблюдаемой зависимостью (рис.4, кривая 1). Как известно, напряжение на накопительном конденсаторе в рассматриваемой схеме лазера превышает удвоенное напряжение на ВВ на величину обратного напряжения на аноде тиратрона [5, 6]. Из рис.4 (кривая 1) видно, что напряжение на C_i превышает напряжение на накопительном конденсаторе только при напряжении на выпрямителе ~ 4.0 кВ, т.е. при зарядке C_i имеется незначительный вклад индуктивной составляющей импеданса разрядного контура лазера. Зная напряжение U , до которого заряжается C_i , время накопления t , амплитуду тока I и учитывая линейный характер нарастания тока в зарядной цепи, можно определить величину C_i :

$$C_i = \frac{q}{U} = \frac{It}{2U}. \tag{2}$$

Перечисленные выше параметры ($U = 10$ кВ, $t = 24$ нс, $I = 97$ А), полученные из осциллограмм рис.5, дают согласно (2) значение $C_i = 116.4$ пФ. Фантомный ток в активной среде лазера наблюдается до момента «пробоя активной среды» [1], под которым на самом деле следует понимать пробой промежутка анод–активная среда.

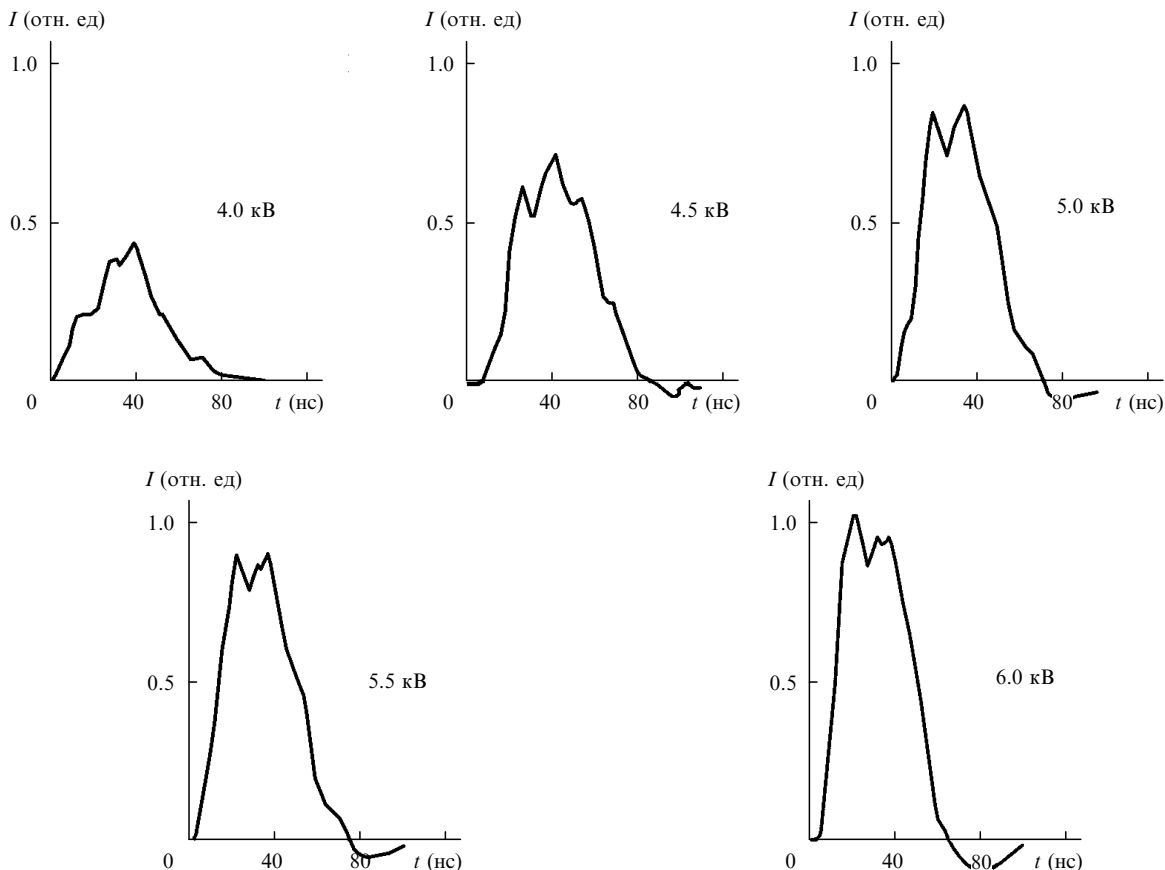


Рис.7. Импульсы генерации при различных напряжениях на ВВ.

Если это соответствует действительности, то пробой этого промежутка должен происходить при достижении определенного напряжения на ГРТ независимо от напряжения на ВВ. В [1, 11] показано, что генерация в лазере начинается с момента «пробоя активной среды». Измерения показали, что в нашем случае генерация всегда начинается при напряжении на ГРТ ~ 6 кВ (см. рис.4, кривая 3). Поскольку электродные узлы ГРТ идентичны, можно с большой уверенностью предполагать, что пробой промежутка катод–активная среда также происходит при напряжении ~ 6 кВ. Это позволяет оценить емкости ГРТ (C_1, C_2, C_3). К моменту пробоя промежутка катод – активная среда (см. рис.5) $U_{C_1} = 10$ кВ, $U_{C_2} = 6$ кВ, $U_{C_3} = 4$ кВ. Полагая $C_1 = C_3$, находим, что $C_1 = C_3 \sim 190$ пФ, а $C_2 \sim 100$ пФ. Поскольку зарядка C_i определяется тиратроном, а скорость нарастания тока не меняется с изменением напряжения на ВВ и составляет 4 А/нс, то это эквивалентно зарядке C_i через сопротивление, которое можно оценить как $R = t/C_i \sim 200$ Ом.

Проведенные исследования и сделанные в работе оценки дают основание полагать, что фантомный ток обусловлен спецификой зарядки емкостных составляющих импеданса разрядного контура лазера. Однако для уверенности в достоверности вышеприведенной интерпретации физических процессов необходимо знать, что в модельных расчетах были учтены все емкостные составляющие импеданса разрядного контура. Исходя из приведенных выше оценок емкость электродных узлов $C_1 = C_3 \sim 190$ пФ, что на порядок выше значения, которое дает расчет, если представлять емкость электродного узла в виде плоского конденсатора. В этом случае эквивалентная емкость ГРТ C_i должна составлять ~ 10 пФ. Значительное расхождение в оценках емкости электродных узлов указывает на возможность существования в ГРТ и разрядном контуре лазера процессов, приводящих к увеличению объемного заряда электродных узлов, что маловероятно, либо на неполный учет всех емкостных составляющих. Такой неучтенной емкостью может являться емкость шин, подводящих ток к ГРТ. Действительно, при прямых измерениях емкость токоподводящих шин с подключенной ГРТ составляла ~ 120 пФ, а с отключенной ГРТ – около 110 пФ (на рис.1 обозначена как C_0). Следовательно, полученная на основании вольт-амперных характеристик разряда эквивалентная емкость $C_i \sim 116.4$ пФ в действительности определяет емкость разрядного контура C_g , которая складывается из значений $C_0 \sim 100 - 110$ пФ и $C_i \sim 5 - 10$ пФ. Моделирование процессов в разрядном контуре лазера (см. рис.1) с учетом этих значений показало результат, подобный приведенному на рис.2. Однако интерпретация физических процессов, протекающих в разрядном контуре лазера, несколько отличается от вышеприведенной.

Сразу же после запуска тиратрона осуществляется параллельное накопление энергии емкостными составляющими импеданса разрядного контура C_0 и C_i . При этом ток, протекающий через ГРТ, является током зарядки емкостной составляющей импеданса ГРТ C_i , а ток, протекающий в это время через тиратрон, – током зарядки емкостной составляющей импеданса разрядного контура лазера $C_g = C_0 + C_i$, что и определяет существенное различие токов, протекающих через тиратрон и ГРТ. Поскольку емкость C_1 включена последовательно с емкостями C_2 и C_3 , то она заряжается до большего напряжения. При достижении на емкости C_1 напряжения ~ 6

кВ происходит пробой разрядного промежутка активная среда – катод. При этом напряжение на емкости C_0 составляет ~ 10 кВ, а емкости C_2 и C_3 заряжены до напряжения ~ 4 кВ и подключены параллельно емкости C_0 . Поскольку емкостные составляющие импеданса разрядного контура заряжаются через тиратрон с допустимой скоростью нарастания тока ~ 4 А/нс, что эквивалентно зарядке через сопротивление ~ 200 Ом, и эта скорость не может возрасти, происходит перераспределение заряда между емкостями C_0, C_2 и C_3 . При этом наблюдается спад напряжения на ГРТ и тока, протекающего через тиратрон (см. рис.5). Исходя из закона сохранения заряда находим, что $C_2 + C_3 \sim 110$ пФ, или $C_2 \sim 90 - 100$ пФ и $C_3 = C_1 \sim 10 - 20$ пФ. Затем емкостные составляющие C_0, C_2 и C_3 заряжаются до напряжения пробоя промежутка активная среда – анод.

Поскольку зарядка C_g определяется тиратроном, а скорость нарастания тока не меняется с изменением напряжения на ВВ и составляет ~ 4 А/нс, то это эквивалентно зарядке C_g через сопротивление, возрастающее с увеличением напряжения на выпрямителе. Когда эквивалентное сопротивление тиратрона становится сравнимым с предимпульсным сопротивлением плазмы, осуществляется переход из первого режима работы во второй (см. рис.6). В нашем случае этот переход осуществляется при напряжении на выпрямителе $\sim 5.5 - 6.0$ кВ. Как видно из осциллограмм рис. 5 и 6, во втором режиме работы скорость нарастания напряжения на ГРТ снижается и не наблюдается перераспределения зарядов между емкостями C_0 и C_2 , что эквивалентно их зарядке через сопротивление R_1 . Зная время зарядки C_0 и C_2 и учитывая, что $t = R(C_0 + C_2)$, можно оценить предимпульсное сопротивление плазмы промежутка активная среда – катод примерно в 500 Ом. В этом случае предимпульсная концентрация электронов n_e , определенная из проводимости плазмы, составляет $\sim 2 \times 10^{11}$ см $^{-3}$, что на порядок ниже ее типичного значения в активной среде лазера. С учетом того, что емкость C_2 является распределенной емкостью, это определяет равенство потенциалов на активной среде во время зарядки емкостных составляющих импеданса разрядного контура лазера как в первом, так и во втором режиме работы.

5. Заключение

Проведенные исследования и сделанные оценки показали.

1. Фантомный ток обусловлен спецификой зарядки емкостной составляющей импеданса ГРТ лазера. Во время существования фантомного тока активная среда находится под равным потенциалом, что не позволяет предимпульсным электронам набрать энергию, достаточную для осуществления неупругих соударений в активной среде.

2. Из-за низкой допустимой скорости нарастания тока через тиратрон реализуется режим работы лазера, при котором зарядка емкостной составляющей импеданса разрядного контура лазера осуществляется через активную среду. Поскольку первый и второй режимы работы лазера равнозначны относительно зарядки емкостной составляющей импеданса разрядного контура, то и во втором режиме активная среда должна находиться под равным потенциалом во время существования фантомного тока.

3. Емкостные составляющие импеданса разрядного контура лазера и ГРТ могут существенно влиять на энергетические характеристики лазера и кинетику процессов в активной среде, что определяет необходимость проведения дальнейшего, более детального исследования.

Экспериментальная часть работы выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект РНП2.1.1.5450).

1. Hogan G.P., Webb C.E. *Opt. Commun.*, **117**, 570 (1995).
2. Little C.E. *Metal Vapour Lasers. Physics, Engineering and Applications* (New York: John Wiley & Sons, 1999, p. 620).
3. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М.: Научная книга, 1998, с. 544).
4. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. *Лазеры на парах меди. Конструкция, характеристики и применения* (М.: Физматлит, 2005, с. 312).
5. Кельман В.А., Климовский И.И., Фучко В.Ю., Запесочный И.П. *Препринт КИЯИ № 85* (Киев, 1985).
6. Юдин Н.А. *Квантовая электроника*, **25**, 795 (1998).
7. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **24**, 596 (1997).
8. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **37** (1), 49 (2007).
9. Hogan G.P., Webb C.E., Whyte C.G., Little C.E., in: *Pulsed Metal Vapour Lasers*. Ed. by C.E.Little and N.V.Sabotinov (New York: Kluwer Acad. Publ., 1995, v. 5, p. 67).
10. Кацнельсон Б.В., Калугин А.М., Ларионов А.С. *Электрорадиотехника и газоразрядные приборы* (М.: Радио и связь, 1985, с. 844).
11. Евтушенко Г.С., Костыря И.Д., Суханов В.Б., Тарасенко В.Ф., Шиянов Д.В. *Квантовая электроника*, **31**, 704 (2001).