

**В.Ф. Елаев, А.Н. Солдатов, Н.А. Юдин**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ ПЛАЗМЫ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ**

Проведены исследования по оптимизации параметров индуктивности, подключаемой параллельно ГРТ в схеме возбуждения ЛПМ. Показано, что при некоторых значениях индуктивности наблюдаются процессы, приводящие к снижению энергетических характеристик генерации ЛПМ. При реактивном сопротивлении индуктивности, на резонансной частоте заряда накопительной емкости, порядка активного сопротивления плазмы, после импульса возбуждения, индуктивность запасает значительную часть энергии накопительной емкости, которая вводится в плазму ГРТ после импульса возбуждения. Это приводит к дополнительной ионизации плазмы и снижает скорость рекомбинационных процессов в плазме ЛПМ.

Предложенный в 1972 г. саморазогревной способ получения паров рабочего вещества в лазере на парах меди (ЛПМ) оказался не только наиболее простым и эффективным способом накачки активной среды, но определил также выбор схемы возбуждения [1]. Схема возбуждения активной среды ЛПМ с резонансной зарядкой накопительной емкости и полным ее разрядом через газоразрядную трубку (ГРТ) с помощью тиратронного коммутатора является наиболее часто используемой до настоящего времени. При такой схеме возбуждения ЛПМ относительно подробно изучены основные зависимости энергетических характеристик генерации от условий возбуждения, геометрии ГРТ, параметров активной среды, а также выяснены основные механизмы ограничения энергетических характеристик генерации.

Параметрическая оптимизация условий возбуждения в ЛПМ проводится за счет выбора оптимальных параметров активной среды (температура активной среды, давление буферного газа) и накачки (величина накопительной емкости, напряжение на выпрямителе источника возбуждения, частота следования импульсов возбуждения).

При исследовании основных закономерностей энергетических характеристик генерации и проведении их оптимизации в работах, как правило, не указывается величина индуктивности  $L$ , которая подключается параллельно ГРТ и служит для заряда накопительной емкости. Считается, что роль индуктивности  $L$  сводится к шунтированию ГРТ во время заряда накопительной емкости.

В работе [2] было показано, что во время заряда накопительной емкости через плазму ГРТ протекают межимпульсные токи, приводящие к снижению энергетических характеристик генерации. В [3] отмечалось, что наличие межимпульсных токов обусловлено выбором в [2] завышенной величины  $L$  и для устранения этого эффекта необходимо уменьшать величину индуктивности  $L$ . Из вышесказанного следует, что роль индуктивности  $L$  в схеме возбуждения ЛПМ не так однозначна, как казалось, и необходимы дополнительные исследования по выяснению ее роли в ограничении энергетических характеристик генерации, что и является целью наших исследований.

Анализ приведенных в [2] результатов показал, что реактивное сопротивление индуктивности  $L$  на резонансной частоте заряда накопительной емкости было порядка 200 Ом, что сравнимо с величиной сопротивления, используемого в подобных схемах возбуждения вместо индуктивности. Для устранения эффекта протекания межимпульсных токов необходимо, чтобы реактивное сопротивление  $L$  на резонансной частоте заряда накопительной емкости было сравнимо с активным сопротивлением плазмы после импульса возбуждения порядка 10 Ом.

Простые оценки показывают, что при времени заряда накопительной емкости 50 мкс таким сопротивлением обладает индуктивность порядка 100 мкГн. Исследования проводились на ГРТ, рабочий канал которой изготовлен из BeO-керамической трубки диаметром 10 мм и длиной 40 см. Буферный газ – неон. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТТИ1-1000/25. В процессе экспериментальных исследований контролировались ток, протекающий

через ГРТ, индуктивность  $L$ , а также напряжение на этих элементах. Величина индуктивности  $L$  изменялась в пределах 100 – 260 мкГн.

Проведенные исследования показали, что при таких значениях  $L$  через плазму не протекают межимпульсные токи, обусловленные зарядом накопительной емкости. Заряд накопительной емкости осуществляется через индуктивность  $L$ , и во время заряда индуктивность  $L$  полностью шунтирует ГРТ. Однако при разряде накопительной емкости часть энергии запасается в индуктивности  $L$ . Величина запасаемой энергии в индуктивности  $L$  зависит как от параметров импульса возбуждения, так и от давления буферного газа и частоты следования импульсов возбуждения. После наложения импульса возбуждения энергия, запасенная в  $L$ , рассеивается в активной среде ГРТ. Зная величину  $L$  и амплитуду максимального тока, протекающего через  $L$ , можно определить величину энергии, запасаемой в индуктивности. Значения запасаемой в  $L$  мощности  $P_L$  при различных условиях эксперимента приведены в таблице (где  $P_{Ne}$  – давление буферного газа,  $P_B$  – мощность, отбираемая от выпрямителя,  $f$  – частота следования импульсов,  $I_{max}$  – амплитуда тока на индуктивности,  $U_B$  – напряжение на выпрямителе).

№ п/п	$P_{Ne}$ , Па	$L$ , мкГн	$P_B$ , Вт	$f$ , кГц	$I_{max}$ , А	$P_L$ , Вт	$U_B$ , кВ
1	27,8	100	640	10	11,4	65	4
2	27,8	100	1050	10	12,5	78	5
3	27,8	260	640	10	9,0	105	4
4	27,8	260	500	5	8,0	42	5
5	27,8	260	1000	10	7,0	64	5
6	13,2	260	800	10	5,5	40	4
7	13,2	260	1400	10	8,4	92	5
8	13,2	100	550	5	8,0	16	5
9	13,2	100	1400	10	12,4	77	5
10	13,2	100	800	10	11,0	60	4
11	13,2	100	230	10	18,0	162	1

Как видно из приведенных в таблице результатов измерений, в индуктивности  $L$  запасается значительная доля от энергии накопительной емкости. Такой дополнительный энерговыход в плазму после импульса возбуждения может осуществлять подогрев плазмы в межимпульсный период и замедлять рекомбинационные процессы. Учитывая, что величина индуктивности  $L$  как минимум на два порядка выше собственной индуктивности ГРТ, можно считать, что энергия, запасенная в  $L$ , полностью рассеивается на активной составляющей плазмы.

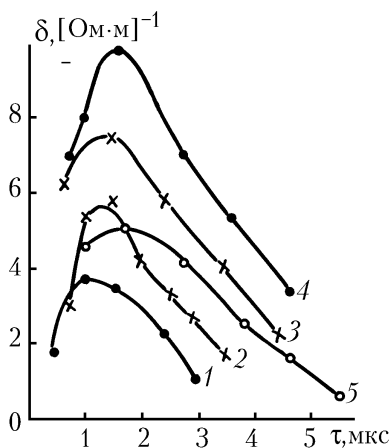


Рис. 1. Временной ход проводимости плазмы ЛПМ после импульса возбуждения при параметрах, приведенных в таблице: кривая 1–1; 2–2; 3–10; 4–9; 5–8

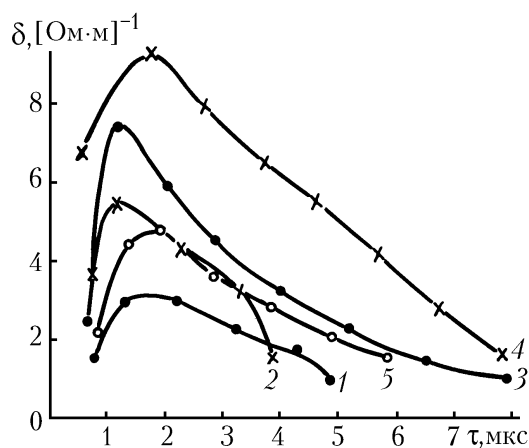


Рис. 2. Временной ход проводимости плазмы ЛПМ после импульса возбуждения при параметрах, приведенных в таблице: кривая 1–3; 2–5; 3–6; 4–7; 5–4

По осциллограммам импульсов тока и напряжения на ГРТ (после импульса возбуждения) можно оценить характер изменения проводимости плазмы, на основе которого можно судить о рекомбинационных процессах, протекающих в плазме ЛПМ. На рис. 1, 2 приведены зависимости изменения проводимости плазмы от условий возбуждения при различных значениях  $L$ . Дополнительный энерговыход запасенной в индуктивности  $L$  энергии приводит не только к замедлению рекомбинационных процессов в плазме, но и к нарастанию проводимости плазмы в

этот период. Характер зависимости изменения проводимости плазмы после импульса возбуждения совпадает с временным ходом концентрации электронов, измеренной по штарковскому профилю линии водорода  $H_{\beta}$  [4].

Следует отметить, что временной ход концентрации электронов, измеренный в [4], на начальной стадии после импульса возбуждения не совпадает с измерениями концентрации электронов в [5]. Исходя из проведенных исследований, можно предположить, что в этих работах в значительной степени различались параметры индуктивности  $L$ . К сожалению, как отмечалось ранее, в работах не указаны параметры этих индуктивностей.

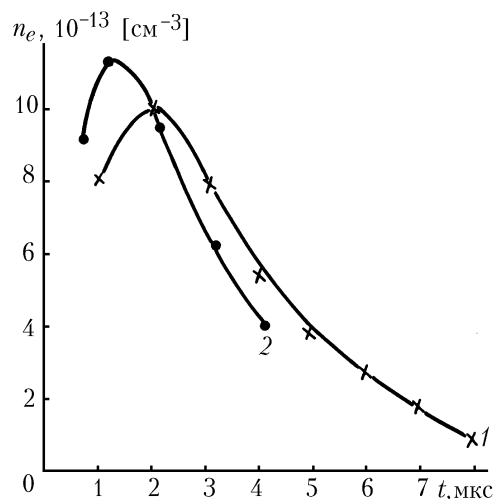


Рис. 3. Временной ход концентрации электронов для параметров, приведенных в таблице: кривая 1–7; 2–9

Измерения концентрации электронов по штарковскому профилю линии водорода проводились в ЛПМ типа «Милан», в которых для заряда накопительной емкости использовались  $L$  порядка 60–300 мкГн [6], что совпадает с величиной  $L$ , используемой нами в работе. На рис. 3 приведено изменение концентрации электронов  $n_e$  в межимпульсный период разряда для двух случаев.

Расчет  $n_e$ , полученный на основе измерения проводимости плазмы в межимпульсный период, проведен в предположении однородного распределения  $n_e$  по радиусу разрядной трубки ГРТ. Значение полного сечения упругого столкновения электронов с атомами неона было взято из [7, 8] и считалось постоянным ( $1,1 \cdot 10^{-16}$  см $^2$ ), а значение температуры электронов  $T_e$  в межимпульсный период – из [9] и в интервале времени измерений считалось также постоянным и равным 2500 К.

Проведенные исследования показали, что индуктивность  $L$ , подключенная параллельно ГРТ, оказывает влияние на процессы в плазме, приводящие к снижению энергетических характеристик генерации ЛПМ. В случае подключения вместо индуктивности  $L$  резистора сопротивлением 200 Ом через плазму ГРТ текут межимпульсные токи, как в схеме, описанной в [2].

Однако в этих схемах возбуждения имеются и отличия. При подключении параллельно ГРТ резистора энергия, запасенная в накопительной емкости, рассеивается на резисторе до тех пор, пока напряжение на ГРТ не достигнет момента пробоя активной среды ГРТ. При подключении параллельно ГРТ индуктивности на ГРТ и индуктивности  $L$  наблюдаются затухающие колебания тока (рис. 4), пока напряжение на ГРТ не достигнет значения, при котором происходит пробой разрядного промежутка ГРТ.

Такое поведение обусловлено тем, что энергия, запасенная в накопительной емкости, перекачивается в параллельный контур, образованный активным сопротивлением ГРТ, индуктивностью  $L$  и собственной емкостью ГРТ. Собственная емкость для исследуемой ГРТ, исходя из наблюдаемого периода колебательного процесса, составляет 250 пФ.

Для повышения энергетических характеристик генерации в описанной схеме возбуждения обычно используют обостряющую емкость, которая подключается параллельно ГРТ. Из вышесказанного ясно, что обостряющая емкость шунтирует индуктивности  $L$  во время разряда накопительной емкости. Оптимальная величина обостряющей емкости подбирается экспери-

ментально в процессе оптимизации ЛПМ. Однако величины обостряющей и накопительной емкостей должны быть больше собственной емкости ГРТ.

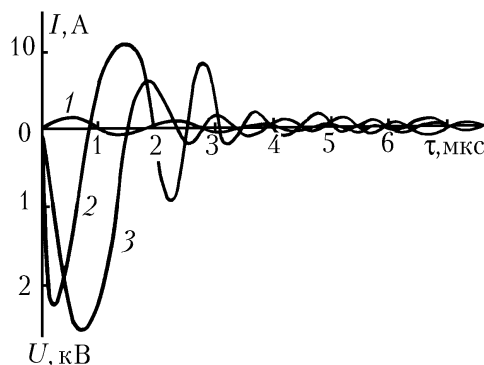


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока, протекающих через ГРТ (1), индуктивность  $L$  (2) и напряжение (3) на этих элементах при параметрах (11) в таблице

Проведенные исследования наряду с исследованиями, описанными в [2], показали, что индуктивность  $L$ , подключенная параллельно ГРТ для заряда накопительной емкости, оказывает паразитное влияние на процессы в плазме ЛПМ, приводящие к снижению энергетических характеристик генерации.

1. Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16 (Вып. 1). С. 40–42.
2. Климовский И. И., Селезнева Л. А. // ТВТ. 1979. Т. 17. С. 27–29.
3. Исаев А. А., Леммерман Г. Ю. // Лазеры на парах металлов и их галогенидах. М.: Наука, 1987. Т. 181. № 10. С. 164–179.
4. Елаев В. Ф., Мельченко В. С., Поздеев В. В., Солдатов А. Н. // Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. Томск: ИОА СО АН СССР. 1978. С. 179–188.
5. Батенин В. М., Бурмакин В. А., Вохмин П. А., Евтюнин А. И., Климовский И. И., Селезнева Л. А. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. С. 1572–1574.
6. Воронов В. И., Евтушенко Г. С., Елаев В. Ф., Карманов Г. А., Кирилов А. Е., Полуниин Ю. П., Солдатов А. Н., Федоров В. Ф., Филонов А. Г. // Прогноз и контроль оптико-метеорологического состояния атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1982. С. 118–137.
7. Grode R. V. // Rev. Mod. Phys. 1933. V. 5. P. 257.
8. Messey H. S. W., Burhop E. H. S. Electronic and Ionic Impact Phenomena I: Collision of Electrons with Atoms. 2nd ed. Oxford. 1969.
9. Елаев В. Ф., Солдатов А. Н., Суханова Г. Б. // ТВТ. 1981. Т. 19. С. 426–428.

Томский государственный университет

Поступила в редакцию  
26 июля 1995 г.

V. F. Elayev, A. N. Soldatov, N. A. Judin. **Investigation of Conduction Behaviour of Cu laser Plasma.**

Optimization of parameters of the inductance connected in parallel with gas-discharge tube (GDT) into excitation circuit of Cu laser has been investigated. The processes resulting in lowering of power characteristics of the laser generation are shown to be observable at any magnitude of the inductance. In the case of reactance, at resonance frequency of reservoir capacitor charge of 200 Ohm and higher, the GDT prisms carries the interpulse currents caused by the charge of the reservoir capacitor. If the resonant frequency of the reservoir capacitor charge caused by the activation pulse is of the order of resistance magnitude, then inductance accumulates a meaningful part of the reservoir capacitor energy which is injected into GDT plasma by the pulse. It leads to additional ionization of the plasma and reduces the rate of recombination processes inside it.