

Н.А. Юдин

УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ТИРАТРОНА В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ ЛАЗЕРОВ НА САМООГРАНИЧЕННЫХ ПЕРЕХОДАХ

Проведен качественный анализ области устойчивой работы тиратрона в разрядном контуре лазеров на самоограниченных переходах, и получена связь этой области с основными электрофизическими характеристиками разрядного контура и плазмы. Показано, что наиболее критичным для устойчивой работы тиратрона является обратное напряжение на тиратроне, а не величина напряжения на выпрямителе.

В схемах возбуждения лазеров на самоограниченных переходах наиболее широкое применение нашли импульсные тиратроны с водородным наполнением. Отличительной особенностью работы тиратронов в схемах возбуждения лазеров является то, что в них за импульс возбуждения теряется до 40–50% энергии, запасаемой в накопительной емкости [1–3]. В свою очередь, согласно [3, 4], потери энергии в тиратроне условно можно разделить на стартовые, в период проводимости и послеимпульсные. Послеимпульсные потери энергии в тиратроне обусловлены рассогласованием сопротивления разряда с волновым сопротивлением разрядного контура, когда после окончания импульса возбуждения накопительный конденсатор оказывается заряженным до отрицательного напряжения $U_c^{\text{обр}}$, называемого обратным. При значительном рассогласовании происходит увеличение $U_c^{\text{обр}}$, которое, в свою очередь, может привести к существенному росту потерь, к обратным зажиганиям разряда в тиратроне и, как следствие, к неустойчивой работе тиратрона. Из этого следует, что потери энергии в тиратроне существенно сказываются на практическом КПД лазеров, а рассогласование сопротивления разряда с волновым сопротивлением разрядного контура в конечном итоге определяет срок службы и надежность работы лазера в целом.

Несмотря на всю актуальность данной проблемы, ее исследованию посвящена лишь одна работа [3], в которой выяснены зависимости потерь энергии в тиратроне от параметров активной среды и условий возбуждения лазера на парах меди (ЛПМ) и определены условия устойчивой работы тиратрона в случае значительного рассогласования сопротивления разряда с волновым сопротивлением разрядного контура, когда $U_c^{\text{обр}} \geq U_{\text{пр}}^{\text{max}}$ – максимальное предельное обратное напряжение на тиратроне.

В данной статье рассматривается режим устойчивой работы тиратрона в случае согласования сопротивления разряда с волновым сопротивлением разрядного контура. Актуальность решения этой проблемы определяется не только выяснением области устойчивой работы тиратрона, но и тем, что

при согласовании реализуется максимальная эффективность активной среды ЛПМ [5, 6].

1. Качественный анализ области устойчивой работы тиратрона

Рассмотрим работу схемы с резонансно-диодным зарядом накопительной емкости и ее влияние на $U_c^{\text{обр}}$.

Полагая, что в качестве коммутатора используется идеальный тиратрон с нулевым внутренним сопротивлением, сопротивление разряда постоянно во времени и равно среднему за время импульса значению R , можно получить:

$$U_c^{\text{обр}} = -U_c^{\circ} \exp(-\alpha\pi/\omega), \quad (1)$$

где $\omega = (\omega_1^2 - \alpha^2)^{1/2}$, $\alpha = R/2L$; $\omega_1^2 = 1/LC$; L и C – индуктивность разрядного контура и накопительная емкость соответственно. С учетом $U_c^{\text{обр}}$ максимальное напряжение, до которого заряжается накопительная емкость (в предположении, что активное сопротивление зарядного контура равно нулю), равно:

$$U_c^{\circ} = 2U_{\text{в}} + |U_c^{\text{обр}}| \quad (2)$$

где $U_{\text{в}}$ – напряжение на выпрямителе. Из (1) и (2) легко получить следующие соотношения:

$$U_c^{\circ} = 2U_{\text{в}}/[1 - \exp(-\alpha\pi/\omega)]; \quad (3)$$

$$U_c^{\text{обр}} = 2U_{\text{в}} \exp(-\alpha\pi/\omega)/[1 - \exp(-\alpha\pi/\omega)]. \quad (4)$$

Исходя из паспортных характеристик тиратронов, тиратроны устойчиво работают в области $U_{\text{пр}}^{\text{min}} - U_{\text{пр}}^{\text{max}}$, где $U_{\text{пр}}^{\text{min}}$ и $U_{\text{пр}}^{\text{max}}$ – минимальное и максимальное значения обратного напряжения на аноде тиратрона. Для устойчивой работы тиратрона необходимо выполнение условий:

$$U_c^{\text{обр}} \leq U_{\text{пр}}^{\text{ред}}; \quad (5)$$

$$|U_{\text{пр}}^{\text{min}}| \leq |U_c^{\text{обр}}| \leq |U_{\text{пр}}^{\text{max}}|, \quad (6)$$

$U_{\text{пр}}^{\text{пред}}$ – предельное значение напряжения на аноде тиратрона. Из (3), (4) видно, что увеличение сопротивления разряда ведет к уменьшению $U_{\text{с}}^{\circ}$ и $U_{\text{с}}^{\text{обр}}$. В случае согласования сопротивления разряда с волновым сопротивлением разрядного контура наиболее критичным для устойчивой работы тиратрона является выполнение условия $|U_{\text{пр}}^{\text{мин}}| \leq |U_{\text{с}}^{\text{обр}}|$.

Из (3)–(6) следует, что:

$$R > (2/\pi) (L/C)^{1/2} \ln[U_{\text{пр}}^{\text{пред}}/(U_{\text{пр}}^{\text{пред}} - 2U_{\text{в}})]; \quad (7)$$

$$(2/\pi) (L/C)^{1/2} \ln[(2U_{\text{в}} + U_{\text{пр}}^{\text{мин}})/U_{\text{пр}}^{\text{мин}}] > R > (2/\pi) (L/C)^{1/2} \times \\ \times \ln[(2U_{\text{в}} + U_{\text{пр}}^{\text{макс}})/U_{\text{пр}}^{\text{макс}}]. \quad (8)$$

Резистивная часть импеданса трубки дается формулой

$$R = 1/\sigma\pi r^2 = m_e v l / n_e e^2 \pi r^2, \quad (9)$$

где e , m_e – заряд и масса электрона; l и r – длина и радиус активной зоны газоразрядной трубки; n_e – концентрация электронов; v – частота упругих столкновений (главным образом с атомами буферного газа), $v = N_g \sigma_m \langle V \rangle$, где N_g – плотность буферного газа (неона); σ_m – сечение столкновений между электронами и атомами буферного газа (неона) и $\langle V \rangle$ – средняя скорость электронов. Мы можем выразить N_g как

$$N_g = 3,5 \cdot 10^{16} (273/T_g) P_{\text{Ne}} \text{ (см}^{-3}\text{)}, \quad (10)$$

где T_g – газовая температура; P_{Ne} – давление неона. Комбинируя все вместе, мы получаем

$$3,5 \cdot 10^{16} (273/T_g) P_{\text{Ne}} \sigma_m \langle V \rangle l / n_e e^2 \pi r^2 > (2/\pi) (L/C)^{1/2} \times \\ \times \ln[U_{\text{пр}}^{\text{пред}}/(U_{\text{пр}}^{\text{пред}} - 2U_{\text{в}})]; \quad (11)$$

$$(2/\pi) (L/C)^{1/2} \ln[(2U_{\text{в}} + U_{\text{пр}}^{\text{мин}})/U_{\text{пр}}^{\text{мин}}] > 3,5 \cdot 10^{16} (273/T_g) \times \\ \times P_{\text{Ne}} \sigma_m \langle V \rangle l / n_e e^2 \pi r^2 > (2/\pi) (L/C)^{1/2} \ln[(2U_{\text{в}} + U_{\text{пр}}^{\text{макс}})/U_{\text{пр}}^{\text{макс}}]. \quad (12)$$

На рис. 1 приведены зависимости изменения границы устойчивости работы тиратронов от величины напряжения на высоковольтном выпрямителе, которые ограничены кривыми 1–3 ТГИЗ-500/16 и 2–4 ТГИ1-1000/25, где $K_1 = \ln[(2U_{\text{в}} + U_{\text{пр}}^{\text{мин}})/U_{\text{пр}}^{\text{мин}}]$ – кривые 1–2 и $K_2 = \ln[(2U_{\text{в}} + U_{\text{пр}}^{\text{макс}})/U_{\text{пр}}^{\text{макс}}]$ кривые 3, 4 соответственно. Кривые 5, 6 определяют границу устойчивости работы этих тиратронов от величины напряжения на аноде соответственно, где $K = [U_{\text{пр}}^{\text{пред}} / (U_{\text{пр}}^{\text{пред}} - 2U_{\text{в}})]$. Как видно из приведенных зависимостей на рис. 1, более критичным для устойчивой работы тиратрона является величина обратного напряжения, а не величина напряжения, до которого заряжается накопительная емкость. Кроме того, при увеличении напряжения на выпрямителе требуется обеспечить нарастание сопро-

тивления разряда, а также уменьшить пределы изменения сопротивления плазмы в рамках области устойчивой работы тиратрона (рис. 2, $K = K_1/K_2$). Это приводит к тому, что практически невозможно обеспечить долговременную устойчивую работу тиратрона при высоких напряжениях на выпрямителе.

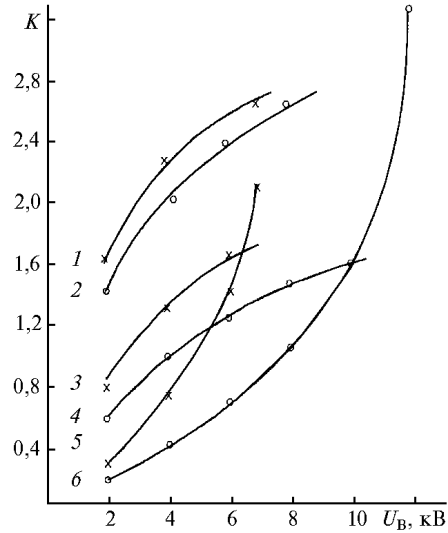


Рис. 1. Зависимость области устойчивой работы тиратронов ТГИЗ-500/16 (кривые 1, 3, 5) и ТГИ1-1000/25 (2, 4, 6) от величины напряжения на выпрямителе

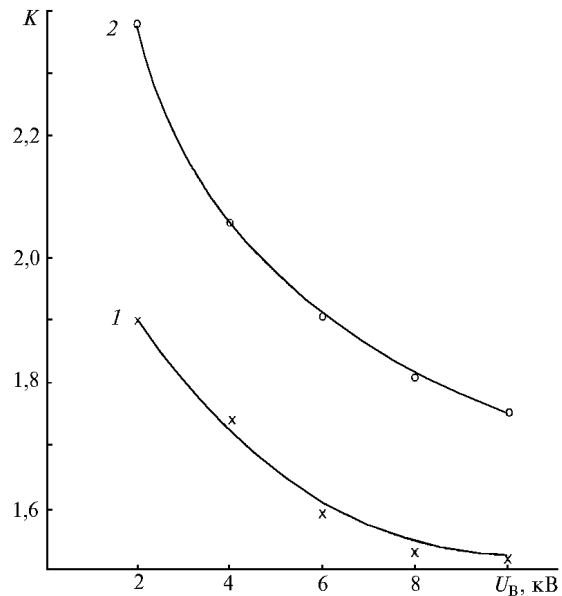


Рис. 2. Пределы изменения сопротивления разряда от величины напряжения на выпрямителе в рамках области устойчивой работы тиратронов ТГИЗ-500/15 (кривая 1) и ТГИ1-1000/25 (кривая 2)

Проведенный анализ показывает, что сопротивление ГРТ будет возрастать линейно с увеличением длины и давления неона и обратно пропорционально газовой температуре и плотности электронов. Для ГРТ с большой апертурой, у которых резистивная компонента может быть меньше, чем реактивная компонента, и

меньше волнового сопротивления, удлинение газоразрядного канала и увеличение давления буферного газа должны приводить к улучшению согласования и повышению эффективности. Увеличение энергии возбуждения или частоты следования импульсов возбуждения при фиксированной средней мощности возбуждения, даже при постоянной температуре стенки, будет иметь результатом повышение n_e и уменьшение сопротивления и, возможно, уменьшение электронной температуры. Данные выводы совпадают с выводами, сделанными в [7]. Учитывая вышесказанное и результаты, приведенные в [5, 6], мы можем заключить, что область эффективной накачки активной среды лазеров на самоограниченных переходах с тиратронной накачкой лежит за пределами области устойчивой работы тиратрона. Возможности оптимизации энергетических

характеристик лазеров на самоограниченных переходах ограничены областью устойчивой работы тиратрона.

1. Бурмакин В.А., Евтюнин А.Н., Лесной М.А., Былкин В.И. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. С. 1000–1004.
2. Исаев А.А., Леммерман Г.Ю., Петраш Г.Г. // Квантовая электроника. 1986. Т.13. С. 1034–1037.
3. Кельман В.А., Климовский И.И., Фучко В.Ю., Запесочный И.П. Исследование особенностей работы тиратрона в цепи возбуждения лазера на парах меди. Киев, 1985. 31 с. (Препринт/КИЯИ-85-16).
4. Фогельсон Т.Б., Бреусова Л.Н., Вагин Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. М.: Советское радио, 1974. 156 с.
5. Демкин В.П., Солдатов А.Н., Юдин Н.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. С. 659–665.
6. Soldatov A.N. and Yudin N.A. // J. of Russian Laser Research. New York, 1995. N 2. P. 128–133.
7. Smilanski I. // Pulser metal vapour lasers. NATO ASI Series. 1995. V. 5. P. 87–99.

Томский государственный университет

Поступила в редакцию
15 октября 1997 г.

N.A. Yudin. Stability of Thyatron Operation in Discharge Circuit of Self-terminating Laser.

The region of thyatron operation in the discharge circuit of self-terminating laser is analyzed qualitatively. A connection between the region of the thyatron stable operation and main electrophysical characteristics of the discharge circuit and plasma has been obtained. It is shown that the reverse voltage in the thyatron is more critical for its operation as compared with the voltage magnitude in rectifier.