

А.Н. Солдатов

ФИЗИКА И ТЕХНИКА ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕДИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Обсуждаются вопросы управления энергетическими, временными и оптическими характеристиками лазеров на парах металлов. Рассмотрены способы управления при наложении дополнительного импульсно-периодического разряда с различной временной задержкой относительно импульса возбуждения. Суперпозиция двух разрядных импульсов в одном активном элементе дает возможность реализовать способ возбуждения с управляемой ионизацией, который позволяет оптимизировать кпд, регулировать длительность и энергию генерации.

1. К лазерам, применяемым для решения различных спектроскопических задач по диагностике газовых, жидких и твердых сред, для создания новых технологий, основанных на спектральных особенностях веществ (разделение изотопов, получение сверхчистых материалов, лазерная обработка материалов и т.д.) предъявляются требования по возможности широкогодиапазонного изменения энергетических, частотных и спектральных характеристик. С этой точки зрения на особом положении среди других лазерных источников находятся импульсно-периодические лазеры на парах металлов (ЛПМ) на переходах с резонансного на метастабильные уровни атомов и ионов (Cu, Pb, Au, Sr и т.д.) вследствие уникального сочетания их качеств [1]. В первую очередь необходимо отметить их способность генерировать импульсы наносекундной длительности с частотами следования в десятки килогерц, что исключительно важно при создании сверхоперативных лазерных систем. Однако можно значительно расширить круг применения этих систем, повысить их информативность, если обеспечить управление выходными лазерными характеристиками.

2. В данной статье анализируется лазер на парах меди (как наиболее характерный для указанного класса лазеров) с точки зрения широкодиапазонного управления генерацией по частоте следования f и длительности импульсов излучения τ , импульсной $W_{\text{и}}$ и средней W мощностями генерации и дискретной λ_i и плавной $\Delta\lambda$ перестройками длин волн. С одной стороны, саморазогревный способ возбуждения ЛПМ, обоснованный в [2], дал возможность резко повысить выходные параметры лазеров, однако не исчерпал потенциала ЛПМ по дальнейшему повышению кпд η , W и f . С другой стороны, указанный метод не позволяет в широких пределах изменять f и имеет ограниченные возможности в управлении W и $W_{\text{и}}$. В связи с этим необходимо дальнейшее развитие саморазогревных, а так же создание новых способов возбуждения и разработка физических и технических принципов управления генерацией в ЛПМ.

3. Комплексное исследование динамики разряда, электрокинетических и оптических характеристик плазмы импульсно-периодического разряда (ИПР) активных сред ЛПМ позволило выяснить, что основными управляющими характеристиками генерации являются температура T_e и концентрация n_e электронов, концентрация активных частиц в основном состоянии N_0 и плотности вынужденного излучения на лазерном переходе ρ_i [3–5].

В типичных условиях самопроизвольного разряда емкости на разрядный промежуток в первые 10–20 нс после начала возбуждения наблюдается быстрый рост T_e , что обеспечивает создание инверсии на рабочем переходе. При T_e , равной 2–4 эВ, ускоряются процессы ионизации, резко возрастает n_e , что, в свою очередь, приводит, с одной стороны, к падению напряженности поля и понижению T_e , т.е. к увеличению скорости возбуждения метастабилей, с другой стороны – к усилению ступенчатого разрушения резонансного уровня. Если предимпульсное значение n_e составляет 10^{12} – 10^{13} см⁻³, то к концу импульса возбуждения (ИВ) уже

10^{14} – 10^{15} см⁻³. Обычно n_e достигает максимума после импульса генерации. Время, которое требуется, чтобы T_e релаксировало до температуры, близкой к газовой T_r , равно $5 \div 10$ мкс, что соответствует максимуму рекомбинационного свечения в послеимпульсный период. Высокое значение T_r на оси разряда вызвано недостаточной теплопроводностью плазмы при высоких удельных энергозатратах в трубках большого диаметра. Последнее приводит к ограничению E , W и f генерации в ИП-разряде продольной конфигурации.

Исследования показали, что две фазы ИПР являются взаимозависимыми, причем максимально достижимые W и f зависят от значений n_e и T_e как в период ИВ, так и в межимпульсный период (МП). Высокая степень ионизации активного вещества (30–80% паров металлов в ИВ), обусловленная прямыми и ступенчатыми процессами, вызывает необходимость длительного релаксационного периода и является фактором, ограничивающим f и W , а большие паразитные энергозатраты в ИВ приводят к существенному занижению КПД и W .

4. Основываясь на результатах спектроскопической диагностики, нами было предложено уменьшать n_e в период генерации путем использования высоких разрядных емкостей или за счет понижения энергозатрат в ИВ путем его «укорочения». В сочетании с диффузионным охлаждением это позволило поднять верхнюю границу f существования инверсии в ИПР (в парах Cu до 235 кГц, в парах Au до 150 кГц), оптимальные частоты следования в трубках \varnothing 4–6 мм до 50–60 кГц и достичь $W = 50$ –60 Вт в трубках с активным объемом 0,5–0,8 л [3, 6, 7]. Расчеты показали, что сокращение степени ионизации в ИВ позволяет поднять физический КПД Cu-лазера до 10% (отношение энергии генерации к энергии, вкладываемой в разряд до конца импульса генерации) [8].

5. Рассмотрим лазеры с управляемыми f , W , E . Анализ процессов, протекающих в ЛПМ, показал возможность высокооперативного управления E и W при перестройке f путем изменения n_e и T_e в любой фазе разряда. Регулирующими воздействиями при этом являются напряженность $U(t)$ и ток $I(t)$ разряда. Физической основой разработанных методов управления являются раздельная оптимизация нагрева и возбуждения активной среды. Для саморазогревных лазеров это осуществляется с помощью наложения двух импульсно-периодических разрядов. За счет изменения формы импульсов и величины вкладываемой энергии осуществляется управление генерацией путем изменения населенностей уровней в основном N_0 и возбужденных N^* состояниях, n_e и T_e . Эти принципы легли в основу новых способов стабилизации E и W при оперативном изменении f [9].

Одним из вариантов стабилизации E является одновременное формирование ИВ и дополнительного импульса (ДИ) длительностью τ_d (рис. 1). Крутизна и амплитуда последнего меньше соответствующих параметров ИВ, а энергия, которая вкладывается в разряд в течение ДИ, в K раз превышает энергию ИВ. Значения τ_d и K должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$\tau_d = (f_{\max} - f) / f f_{\max}; \quad K = (f_{\max} - f) / f, \quad (1)$$

где f_{\max} – верхняя граница частот возбуждения лазера. Такой способ возбуждения при перестройке f требует изменения только одного параметра – энергии ДИ за счет изменения τ_d . В случае необходимости регулирование импульса генерации может осуществляться, например, изменением амплитуды $U(t)$. В диапазоне частот $1 \div 6,5$ кГц точность стабилизации E составляла 1,5 %, при изменении f со скоростью $1 \div 2$ кГц/мин (рис. 2).

6. Опишем лазеры с управляемой длительностью генерации. В зависимости от условий возбуждения (давления буферного газа P_6 температуры стенки $T_{ст}$) τ^r изменяется сложным образом [10]. Однако в большинстве случаев изменение P_6 и $T_{ст}$ являются процессами инерционными. Поэтому для высокооперативного управления τ^r был предложен способ, предусматривающий наложение на разрядный промежуток дополнительного «управляющего» ИПР, имеющего ту же f , что и основной, но с переменной временной задержкой управления $\tau_{3,y}$. В этом случае управляющими параметрами τ^r являются микрохарактеристики n_e , T_e , N_0 , концентрация метастабилей N_m , а регулирующим воздействием – $\tau_{3,y}$ или $U(t)$. Дополнительный импульс, «подогревая» T_e , уменьшает скорость рекомбинации плазмы, повышает концентрации n_e , N_m , изменяя тем самым начальные условия последующего импульса возбуждения. Сохра-

нение теплового баланса в активном элементе осуществляется соблюдением условия ($E_b + E_v$) $f = \text{const}$ [9]. Этот же метод работает и как способ управления цветностью, когда генерируют одновременно две или несколько спектральных линий (например, в Си-лазере $\lambda_1 = 0,51$ и $\lambda_2 = 0,58$ мкм). Указанный способ возбуждения реализован в [10]. На рис. 3 показаны результаты быстрого изменения τ^r от 1,5 до 30 нс и цветности излучения.

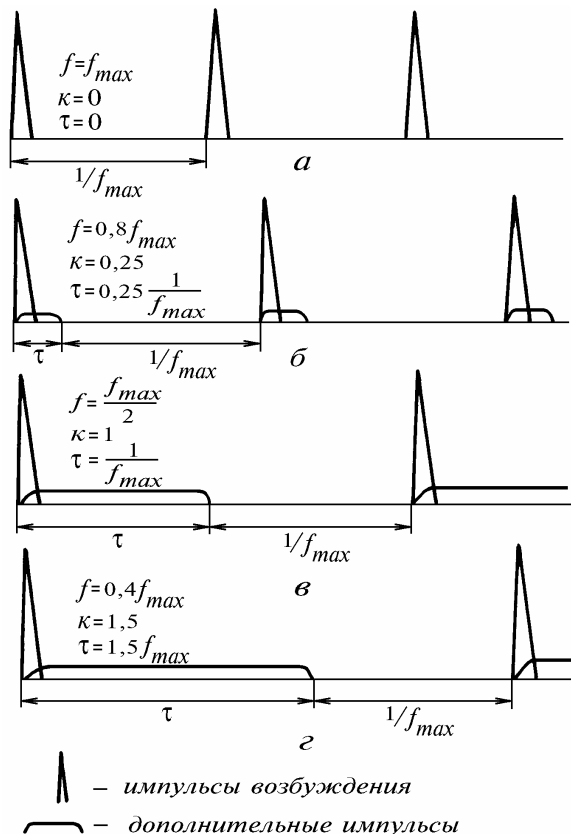


Рис. 1. Диаграммы метода возбуждения лазера со стабилизацией энергии генерации при изменении f

7. Рассмотрим ЛПМ с комбинированным способом нагрева активной среды. Достоинством лазеров, в которых выходные генерационные параметры регулируются за счет формирования дополнительных импульсов тока, является простота конструкции саморазогревных лазерных трубок. Однако ДИ отрицательно влияет на состояние активной среды, что приводит к снижению максимально возможных f , W и КПД лазера. Лучшие результаты при управлении генерацией может дать способ разогрева активной среды до рабочих температур с помощью встроенных омических нагревателей, располагающихся внутри или снаружи высокотемпературного канала [1].

В схеме лазера со встроенным омическим нагревателем в виде спирали (рис. 4) через блок регулировки подается питание заданной мощности от источников нагрева и возбуждения. После достижения рабочей температуры блок синхронизации в момент нулевого значения синусоидального напряжения запускает источник возбуждения с частотой повторения, определяемой задающим генератором. При этом блок регулировки уменьшает амплитуду напряжения источника нагрева до величины, обеспечивающей квазистационарный тепловой режим рабочего объема. При этом необходимо выполнение следующих условий:

$$I_0 U_0 = P - \Delta E f; \omega = k \pi f; U_0 < U_d, \quad (2)$$

где U_0 и I_0 – амплитуда синусоидального напряжения и тока нагревателя; U_d – напряжение горения дугового разряда в активной среде лазера; P – мощность, необходимая для разогрева лазера до рабочей температуры; ΔE – доля энергии импульса возбуждения, диссипирующей в тепло.

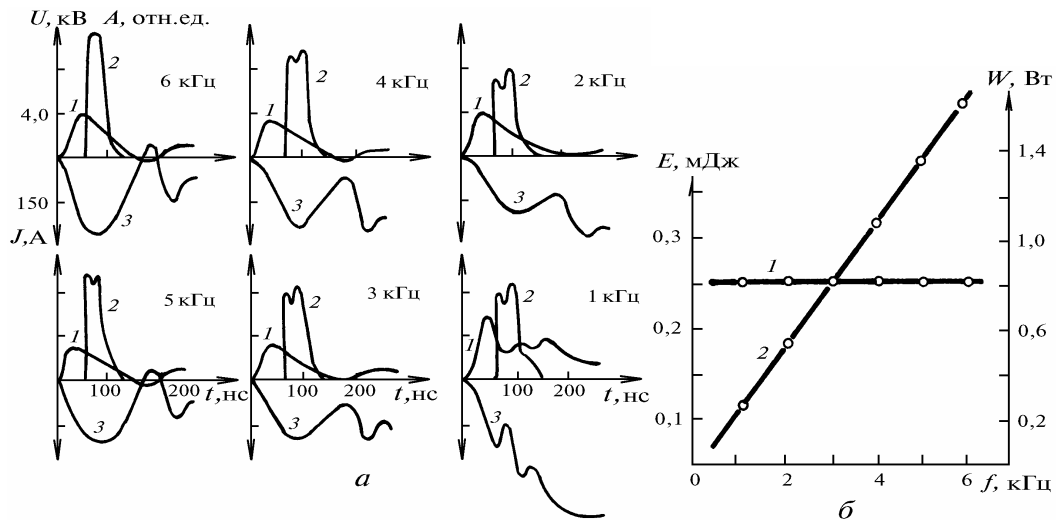


Рис. 2. Зависимость импульсов напряжения (1), генерации (2), тока (3) – а, а также энергии в импульсе (1) и средней мощности (2) – б, от частоты следования импульсов при работе лазера в режиме стабилизации

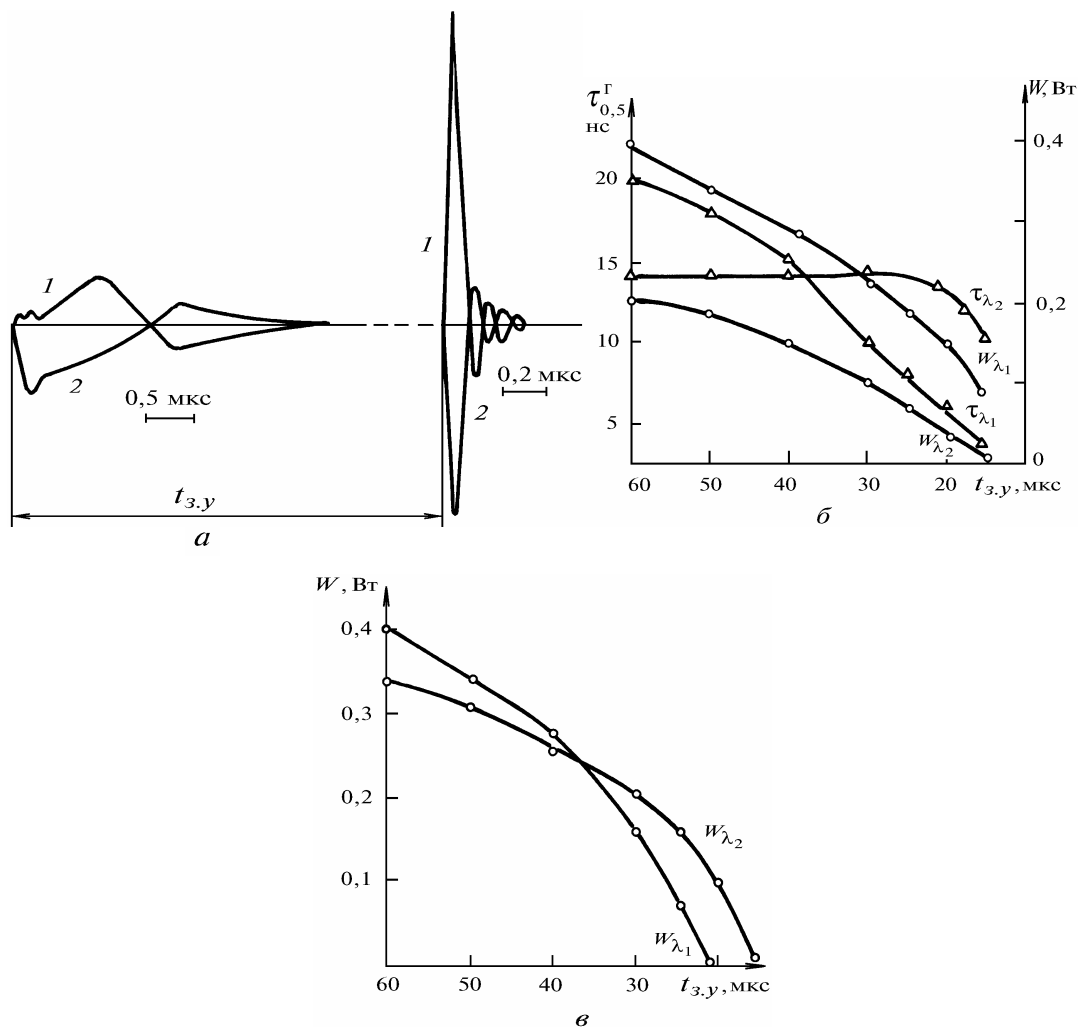


Рис. 3. Характерные осциллограммы тока (1) и напряжения (2) импульсов управления (слева) и возбуждения (справа) – (а). Зависимость длительности, средней мощности генерации (б, в) зеленой (1) и желтой (2) линий спектра от величины задержки $t_{3,y}$

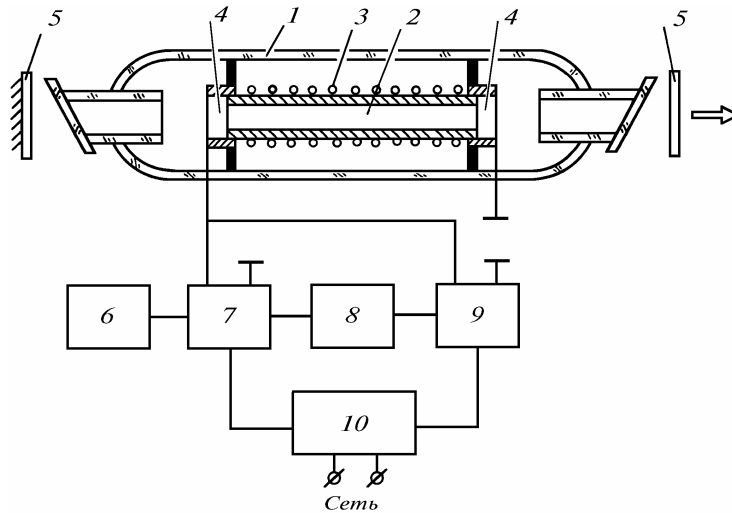


Рис. 4. Схема стабилизированного лазера со встроенным омическим нагревателем: 1 – герметический кожух; 2 – газоразрядный канал; 3 – нагреватель; 4 – электроды; 5 – зеркала резонатора; 6 – задающий генератор импульсов; 7 – источник нагрева; 8 – блок синхронизации; 9 – источник возбуждения; 10 – блок регулировки

Такой принцип работы обеспечивает, с одной стороны, оптимизацию импульсов возбуждения лазера по максимальной W или η , с другой – сокращение мощности, рассеиваемой коммутаторами, что ведет к увеличению срока службы лазера в целом. Основное отличие такого лазера состоит в возможности его работы в дежурном режиме, когда его готовность к работе поддерживается только мощностью нагревателя. Кроме того, возможна плавная регулировка f от нуля до f_{\max} . Высокооперативными управляющими импульсами E и W является амплитуда напряжения импульса возбуждения.

8. Общей особенностью работы системы генератор–усилитель (ГУ) является копирование, в определенной степени, в усилительных каскадах основных параметров излучения задающего генератора по форме и длительности τ^r . Поэтому описанные выше способы оперативного управления генерацией могут быть использованы и в системах ГУ, однако возможности их расширяются, т.к. в ГУ E , W и $W_{\text{и}}$ могут изменяться в более широком диапазоне. В частности, изменяя временную задержку между импульсами возбуждения генератора и усилителя $\tau_{\text{ГУ}}$, можно по линейному закону изменять E и W . Результаты этого эксперимента демонстрируются на рис. 5.

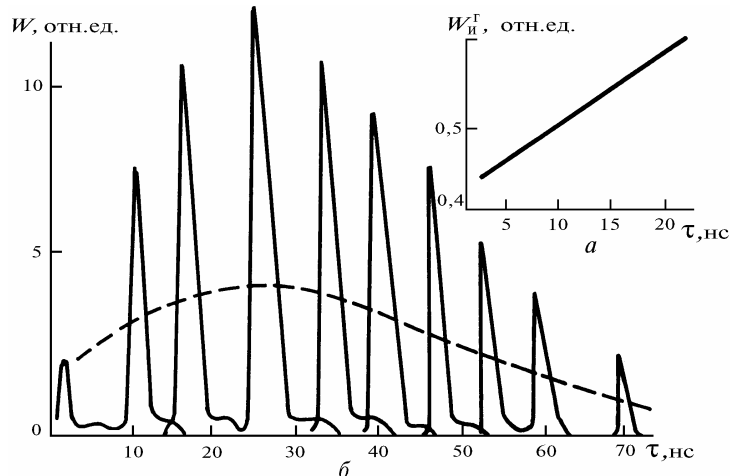


Рис. 5. Зависимость W системы ГУ от τ^r (а). Зависимость импульсной мощности генератора $W_{\text{и}}^r$ системы ГУ от времени задержки между импульсами возбуждения генератора и усилителя (б). Штриховая линия – сверхизлучение

Другим способом управления генерацией в системе ГУ является изменение τ^r лазера-генератора, что позволяет регулировать величину энергии за счет <вырезания> инверсии разной длительности в активной среде усилителя. В этом случае управление будет осуществляться посредством изменения мощности вынужденного излучения ρ_p , а регулирующим воздействием – длительность генерации τ^r .

9. Указанные в п. 5 и 6 способы управления генерацией являются частными случаями более общего режима с управляемой ионизацией, который реализуется либо суперпозицией нескольких ИПР на один разрядный промежуток, либо включением в цепь самопроизвольного разряда емкости дополнительного управляющего элемента.

Двухканальный, суперпозиционный ИП-разряд в парах металлов и их соединений представляется как один из универсальных методов возбуждения, который дает возможность проводить прямые экспериментальные исследования физических особенностей ЛПМ. Кроме того, этот метод через возможность <моделирования> сложной формы импульсов возбуждения позволяет производить управление n_e и T_e (как в момент ИВ, так и в МП) и обеспечивает более полную оптимизацию лазера по кпд, f , W_n , расходимости излучения и т.д.

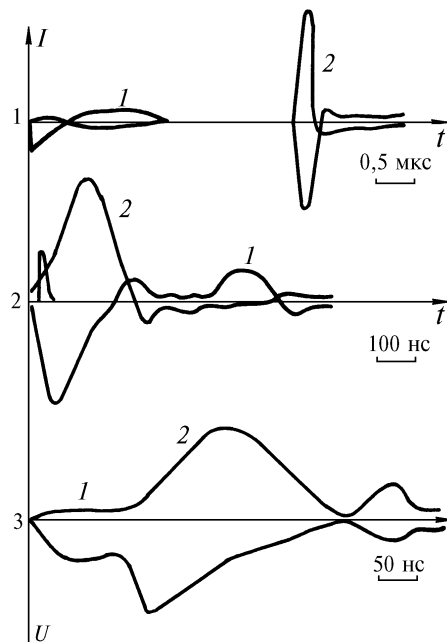


Рис. 6. Осциллограммы ДИ (1) и ИВ (2) при различных временных задержках: а – ДИ выполняет роль управляющего мощностью генерации и цветностью излучения через изменение n_e и N_M ; б – ДИ выполняет роль дополнительного разогрева; в – суперпозиция ДИ и ИВ обеспечивает <сложную> форму импульса накачки с пологим передним фронтом тока

На рис. 6 представлены различные случаи импульсных вольтамперных характеристик в смеси Cu–Ne при фиксированных параметрах цепи возбуждения C_B , U_B и цепи дополнительного разряда C_D , U_D . В порядке обсуждения возможностей такого разряда с управляемой формой импульса возбуждения приведем следующие соображения.

В первом случае при формировании ДИ с $T_e \leq T_e^{\text{пор}}$ (превышение пороговой температуры электронов $T_e^{\text{пор}}$ вызывает генерацию) регулировка $\tau_{3,y}$ позволяет воздействовать на предимпульсные электрокинетические параметры и населенности метастабилей и управлять интенсивностью и цветностью излучения (см. рис. 3).

Во втором случае целевое формирование <сложной> формы ИВ (в отличие от <простой>, которая реализуется при самопроизвольном разряде емкости через активный объем) дает возможность либо реализовать оперативное управление длительностью импульса генерации, либо получить максимальный кпд, повышенную f и т.д.

На рис. 7 продемонстрирован результат эксперимента, в котором значение τ^r равнялось 200 нс, а изменение длительности импульса возбуждения позволяло регулировать τ^r в пределах 3–200 нс. Заметим, что формирование $\tau^r = 100\text{--}200$ нс дает возможность в одном активном объеме совместить функции генератора и усилителя. Это, в свою очередь, позволяет повысить до 90% долю энергии импульса генерации, сосредоточенную в пучке с дифракционной расходимостью.

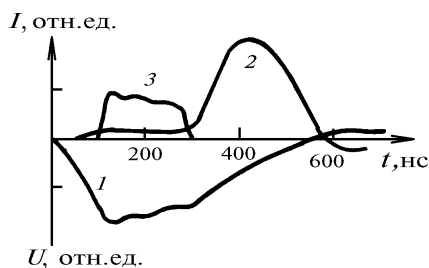


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока (2), генерации (3) в режиме управляемой ионизации

10. Развитие ЛПМ привело к созданию экспериментальных и промышленных приборов, генерирующих на дискретных длинах волн в области 300–6500 нм. Сочетание управляемого короткоимпульсного излучения с высокой f , генерируемого ЛПМ, с широкодиапазонной плавной перестройкой λ в лазерах на красителях и центрах окраски, обеспечивает идеальную систему для многих спектроскопических технологий и методов исследования.

Большинство работ в этом направлении было нацелено на расширение спектрального диапазона перестройки $\Delta\lambda$ при повышенном кпд преобразования. Оптимизация многокомпонентных смесей красителей способствует увеличению эффективности генерации в области 600–700 нм при накачке Cu-лазером. Применение в качестве источников накачки Pb- и Au-лазеров позволяет продвинуть область плавной перестройки до 835 нм. Преобразование излучения ЛПМ на центрах окраски дает возможность расширить диапазон перестройки до 1 мкм [1, 12], а также получить эффективное преобразование в области 2–3 мкм. Плавное перекрытие диапазона $\Delta\lambda$ до 260 нм в сторону УФ-излучения осуществляется посредством преобразования излучения генерации красителей с накачкой ЛПМ во вторую гармонику.

Таким образом, комбинация преобразования излучения ЛПМ в красителях, кристаллах с центрами окраски и нелинейных кристаллах [13] позволяет перекрыть с плавной перестройкой диапазон $\Delta\lambda$ от 0,26 до 3 мкм. Отметим, что в этом случае хотя и происходит уменьшение энергии импульса генерации ЛПМ, соответствующее кпд преобразования, тем не менее оставшаяся совокупность параметров, присущая ЛПМ по длительности и частоте повторения, управляемости параметров генерации сохраняется.

11. Обсуждаемые в статье принципы и способы управления генерацией реализованы в ряде случаев в приборных вариантах лазеров или апробированы в эксперименте. Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время в области исследования ЛПМ сложилось новое направление – лазеры на парах металлов с управляемыми параметрами генерации.

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 150 с.
2. Исаев А.А., Петраш Г.Г. // Тр. ФИАН. 1975. Т. 81. С. 3.
3. Arshinov Yu.F., Zuev V.E., Soldatov A.N., et al. // Proc. Intern. Conf. of Lasers'82, New Orleans. STS Press McLean, 1982. P. 482.
4. Елаев В.Ф., Солдатов А.Н., Суханова Г.Б. // ТВТ. 1980. Т. 18. С. 1090.
5. Солдатов А.Н., Шапарев Н.Я., Кирилов А.Е. и др. // Известия вузов СССР. Сер. Физика. 1980. N. 10. С. 38.
6. Soldatov A.N., Fedorov V.F. // Proc. Intern. Conf. of Lasers'82, New Orleans. STS Press McLean, 1982. P. 478.
7. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. // Известия вузов СССР. Сер. Физика. 1983. Т. 9. С. 80.
8. Демкин В.П., Купчинский Н.Л., Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. // X Всесоюзн. конф. по физике электронных и атомных столкновений. Ужгород, 1988. С. 193.
9. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. С. 974.
10. Евтушенко Г.С., Полуни Ю.П., Солдатов А.Н. и др. // ЖПС. 1988. Т. 49. С. 745.
11. Soldatov A.N., Suhanov V.B. // Proc. Intern. Conf. of Lasers'82, New Orleans. STS Press McLean, 1982. P. 493.

12. German K.R., Karra T.W. // Proc. Intern. Conf. of Lasers'79, Orlando. STS Press McLean, 1979. P. 374.
13. Солдатов А.Н., Полуни Ю.П., Холодных А.И. // ЖТФ. 1981. N. 4. С. 866.

Томский госуниверситет
им. В. В. Куйбышева

Поступила в редакцию
2 марта 1993 г.

A. N. Soldatov. Physics and Technology of Copper-Vapor Lasers with Controlled Parameters.

This paper presents a discussion of problems on regulation of the energy, temporal, and optical parameters of metal-vapor lasers. Some ways to regulate these parameters by applying to a discharge tube additional pulse-periodic voltage in a variable time delay with respect to the main excitation pulse are observed. Such a superposition of two pulse-periodic discharges in one and the same tube enables one to perform excitation with a regulated ionization, what, in its turn, allows one to optimize the efficiency and vary the duration and energy of laser generation.