

# Влияние предимпульсной плотности электронов и населенности нижнего лазерного уровня на достижимую частоту повторения импульсов в лазере на парах меди

Г.Г.Петраш

*Рассмотрены ограничения достижимой частоты повторения импульсов в лазере на парах меди и в связи с этим – существование критической предимпульсной плотности электронов, обсуждаемое в работе С.И.Яковленко («Квантовая электроника», 2000, т.30, №6, с.501), а также новые аргументы в пользу существования критической плотности, изложенные в работе А.М.Бойченко и С.И.Яковленко («Квантовая электроника», 2002, т.32, №2, с.172). Сделан вывод о том, что и новые аргументы не доказывают существования критической плотности.*

**Ключевые слова:** лазер на парах меди, ограничения частоты повторения импульсов.

## 1. Введение

Вопрос о том, что ограничивает частоту повторения импульсов лазера на парах меди (ЛПМ), имеет давнюю историю (см., напр., [1, 2]). В последнее время этот вопрос снова активно обсуждается. В частности, в работе С.И.Яковленко [3] рассматривалось влияние предимпульсной плотности электронов  $N_{e0}$ . В [3] сформулировано представление о критической предимпульсной плотности электронов  $N_{e cr}$ , при превышении которой генерация невозможна. В нашей предыдущей работе [4] было высказано сомнение в существовании  $N_{e cr}$  и сделан вывод о том, что изложенный в [3] подход не может обосновать существование  $N_{e cr}$ . В работе А.М.Бойченко и С.И.Яковленко [5] приводятся новые аргументы в пользу существования  $N_{e cr}$ . Настоящая работа посвящена их анализу.

Прежде всего необходимо уточнить, как мы понимаем предмет дискуссии. В наших работах, в том числе в работах [1, 2, 4] и длительных обсуждениях, упомянутых во Введении к работе [3], рассматривается вопрос о предельной частоте повторения импульсов  $f_{lim}$ , т. е. о такой частоте, которая связана с фундаментальными физическими ограничениями, а не с техническими трудностями, такими как несовершенство конструкции газоразрядных трубок и систем импульсного питания, а также неудачный выбор режима работы.

Упоминалось, что существует несколько факторов, которые могут ограничивать частоту повторения  $f$ , в том числе перегрев активной среды и чрезмерная вводимая в нее удельная мощность. При устранении этих факторов основную роль могут играть ограничения, связанные с высокой предимпульсной населенностью нижних лазерных (метастабильных) уровней  $N_{m0}$  и большой предимпульсной плотностью электронов  $N_{e0}$ . Относительная роль этих двух факторов зависит от конструкции газора-

зрядной трубки (ГРТ), характеристик системы питания и режима работы.

## 2. Формула для $N_{e cr}$

В нашей работе [4] содержалась критика вывода формулы для  $N_{e cr}$ , приведенной в [3]. Поскольку в новой статье [4], по существу, нет ответа на эту критику, а формула для  $N_{e cr}$  осталась неизменной, необходимо снова вернуться к этому вопросу. Уравнение для  $N_{e cr}$  получено в [3] путем приравнивания мощности, вводимой в среду при пиковой плотности тока  $j_{max}$ , к мощности, затрачиваемой на ионизацию меди при критической температуре электронов  $T_{e cr}$ :

$$\frac{j_{max}^2}{\sigma(T_{e cr})} = \frac{j_{max}^2 m_e}{e^2 N_{e cr}} [k_{Ne}(T_{e cr})N_{Ne} + 2k_{ei}(T_{e cr})N_{e cr}] \quad (1)$$

$$= J_{iCu} k_{iCu}(T_{e cr}) N_{e cr} N_{Cu},$$

откуда получаем

$$N_{e cr} = N_{e cr0} [a + (a^2 + 1)^{1/2}], \quad (2)$$

где

$$N_{e cr0} = \frac{j_{max}}{e} \left[ \frac{m_e k_{Ne}(T_{e cr}) N_{Ne}}{J_{iCu} k_{iCu}(T_{e cr}) N_{Cu}} \right]^{1/2} \quad (3)$$

– критическая плотность электронов в случае, когда проводимость определяется столкновениями с нейтральными частицами, т. е. при  $k_{Ne}(T_{e cr})N_{Ne} \gg k_{ei}(T_{e cr})N_{e cr}$ ;

$$a = \frac{k_{ei}(T_{e cr})N_{e cr}}{k_{Ne}(T_{e cr})N_{Ne}}$$

– безразмерная величина;  $\sigma$  – проводимость плазмы;  $k_{Ne}$ ,  $k_{ei}$  – константы скорости упругих столкновений электро-

нов с атомами неона и ионами меди;  $N_{\text{Ne}}, N_{\text{Cu}}$  – плотности атомов неона и меди;  $J_{\text{ICu}}$  – потенциал ионизации меди (7.73 эВ);  $k_{\text{ICu}}$  – константа скорости ионизации меди электронами (см. [3]).

Предполагается, что  $j_{\text{max}}^2/\sigma(T_{\text{e cr}})$  – максимальная плотность мощности, вводимой в среду, однако в момент, когда  $j = j_{\text{max}}$  температура  $T_e$  обычно заметно меньше максимальной, т. е., вообще говоря, не равна  $T_{\text{e cr}}$ , так что  $j_{\text{max}}^2/\sigma(T_{\text{e cr}})$  не относится к какому-то определенному моменту времени. Кроме того, в момент, когда  $j = j_{\text{max}}$ , как следует из экспериментов, вводимая мощность не является максимальной. В работе [5] это оспаривается со ссылкой на закон Джоуля – Ленца. На самом деле, максимум плотности вводимой мощности соответствует максимуму  $j^2/\sigma$ , а не максимуму  $j$ . Просто с ростом  $j$  растет и  $\sigma$ , поэтому плотность вводимой мощности достигает максимума раньше, чем плотность тока  $j$ . К тому же к моменту максимума  $j$  генерация, как правило, заканчивается, так что вводимая в этот момент мощность не может прямо влиять на генерацию, которая уже закончилась.

Таким образом, в выражении  $j_{\text{max}}^2/\sigma(T_{\text{e cr}})$  плотность вводимой мощности, скорее всего, занижена. С другой стороны, потери на ионизацию завышены, т. к. в момент генерации ионизация не является прямой, и в основном имеет место возбуждение уровней. В [5] указывается, что потери на ионизацию завышены не более чем в два раза. Однако если учесть, что инверсия в ЛПМ часто имеет место только за счет различия статистических весов рабочих уровней, что для зеленой линии генерации соответствует отношению населенностей уровней с учетом статистических весов, равному всего лишь около 1.5, то предположения, принятые при выводе формулы для  $N_{\text{e cr}}$ , в частности погрешность оценки потерь порядка фактора 2, вряд ли обеспечат достаточную точность для получения надежных результатов.

Наконец, как отмечалось в [4], вывод формулы (2) не корректен еще и по той причине, что форма импульса тока и, в частности, его амплитуда, зависят от  $N_{\text{e0}}$ . Это наблюдалось во многих экспериментах. Кстати, сравнение рис.2,а и 3,а из работы [5] показывает, что и собственный расчет авторов [5] приводит к тому же выводу. Так что вместо  $j_{\text{max}}$  при выводе формулы (2) надо брать  $j_{\text{max}}(N_{\text{e0}})$ , при этом решение для  $N_{\text{e cr}}$  должно измениться. Из сказанного следует, что рассматриваемая формула (2) не может надежно описать влияние концентрации  $N_{\text{e0}}$  на предельную частоту повторения.

В нашей работе [4], в отличие от работы [3], плотность мощности, вводимой в среду, выражается не через плотность тока  $j$ , а через поле в плазме  $E$ , т. е. вместо  $j^2/\sigma$  используется  $\sigma E^2$ . На наш взгляд, это никак не меняет физической модели, поскольку  $j^2/\sigma = \sigma E^2$ . Однако выражение плотности мощности через поле более удобно для рассмотрения вопроса о том, как можно нагреть электроны до нужной температуры  $T_e$ . Поле  $E$  в активной среде определяется приложенным к ГРТ напряжением за вычетом катодного и анодного падения и напряжения на холодных концевых участках ГРТ, где нет паров меди. Все это в определенной мере может изменяться экспериментатором. Приложенное к ГРТ напряжение определяется системой импульсного питания, а падение напряжения на внешних по отношению к активной зоне частях ГРТ – выбором ее конструкции и применяемых материалов.

Таким образом, вопрос о том, можно ли получить в активной среде желаемое  $T_e$ , а следовательно, инверсию и генерацию, сводится к вопросу о возможности построения системы питания, обеспечивающей желаемую зависимость напряжения на ГРТ  $U(t)$ , с учетом процессов на электродах и в концевых зонах. Если источник импульсного питания позволяет за малое время, в течение которого  $N_e$  не успевает заметно измениться, поднять напряжение на ГРТ до величины, соответствующей  $T_e > T_{\text{e cr}}$ , то период времени, в течение которого преимущественно заселяются метастабильные уровни, будет коротким, а заселение метастабильных уровней – незначительным, что позволит получить инверсию и генерацию, если при этом  $N_{\text{m0}}$  не будет велико.

В работе [5] не рассматриваются возможности усовершенствования систем питания, однако в ней есть следующее утверждение: «В то же время, выразив  $j$  через  $E$ , автор [6] (Г.Г.Петраш) перешел к другой физической модели. В рамках его модели источник накачки может иметь сколь угодно большую мощность. Действительно, при заданном  $E$  плотность мощности, вводимой в среду,  $\sigma E^2 \propto N_e E^2$ , сколь угодно велика, если сколь угодно велико  $N_e$ ».

На самом деле для получения инверсии в любом случае необходимо ввести в активную среду за ограниченное время достаточную мощность, каким бы выражением она ни описывалась. Само же утверждение о необходимости сколь угодно большой мощности, на наш взгляд, основано на недоразумении, поскольку применительно к ЛПМ бессмысленно говорить о сколь угодно большом  $N_e$ . Очевидно, что нет смысла использовать  $N_e$ , большее начальной плотности атомов меди, т. к. в активной среде в нормальных условиях работы ионизируется практически только медь, а при полной ионизации меди, как неоднократно упоминалось в наших работах (см., напр., [1, 2]), достижение высокой частоты повторения импульсов  $f$  ограничивается просто медленной рекомбинацией.

С другой стороны, известно, что реальные импульсно-периодические ЛПМ работают в ограниченном диапазоне плотностей меди. Наконец, выбирая благоприятные условия для получения предельной частоты  $f$ , нет необходимости работать при высокой плотности меди. Скорее наоборот, предельной частоты повторения импульсов легче достичь при умеренной плотности меди.

Таким образом, в реальных условиях никакой «сколь угодно большой» мощности от источника питания не требуется. Импульс напряжения на ГРТ должен иметь достаточно крутой фронт с тем, чтобы определенное время поддерживать  $T_e > T_{\text{e cr}}$ , желательно около 3–3.5 эВ. Чтобы доказать существование  $N_{\text{e cr}}$ , надо доказать, что существуют физические, а не технические причины, которые не позволяют построить такие источники питания. Кроме того, как упоминалось в [1, 2, 4], требования к фронту напряжения на ГРТ могут быть снижены путем надлежащей организации процессов на электродах и в холодных зонах ГРТ (см., напр., [1, 2]).

Еще одно требование к источнику питания – минимизация энергии, вводимой в активную среду сразу после окончания генерации. Эта энергия приводит к дополнительному нагреву газа, дополнительной ионизации и дополнительному заселению метастабильных уровней. Это, в свою очередь, ведет к увеличению  $N_{\text{m0}}$  и  $N_{\text{e0}}$ , т. е. затрудняет получение генерации в следующем импульсе

и препятствует увеличению  $f$  и эффективности генерации, поэтому оптимизация системы питания должна включать в себя и меры по уменьшению энергии, вкладываемой после окончания генерации.

### 3. Моделирование кинетики ЛПМ и обоснование существования $N_{e\text{cr}}$

В работах [3, 5], а также [6–8] приводятся результаты моделирования ЛПМ, которые также используются для обоснования существования  $N_{e\text{cr}}$ . Расчеты проводились для различных ГРТ и схем импульсного питания с тиратроном. Здесь мы остановимся на результатах моделирования, описанных в [5]. Рассматривается вариант трехконтурной электрической цепи (подробнее см. в [5]) с некими фиксированными значениями емкостей и индуктивностей. Выбор схемы, ее элементов и режима работы никак не обосновывается. Делаются расчеты кинетики процессов при разных  $N_{e0}$ , однако трудно понять, к какой частоте повторения они относятся.

Оценки показывают, что при принятом зарядном напряжении 14 кВ уже при  $f = 10$  кГц, когда обычно еще не проявляются ограничения, связанные с  $N_{e0}$  или  $N_{m0}$ , средняя мощность, отбираемая от конденсаторов, составит 2.4 кВт. Для ГРТ длиной 40 см такая мощность уже близка к мощности, вызывающей перегрев активной среды, так что сколько-нибудь существенному увеличению  $f$  в этом случае будет препятствовать именно перегрев, т. е. увеличение равновесной концентрации  $N_m$ . На основании рассмотренного примера вряд ли можно что-то сказать о влиянии  $N_{e0}$  на достижимую частоту повторения.

Вообще надо отметить, что моделирование конкретной ГРТ с конкретной системой питания не может дать ответ на вопрос о достижимых характеристиках генерации, в частности о предельной частоте повторения  $f_{\text{lim}}$ , т. к. для этого надо доказать, что рассматриваемый вариант исчерпывает все возможные усовершенствования и ГРТ, и согласованной с ней системы питания. При продвижении к высоким частотам повторения  $f$  во избежание перегрева среды вводимую в нее среднюю мощность необходимо поддерживать примерно постоянной. Это значит, что с ростом  $f$  нужно уменьшать вводимую в каждом импульсе энергию, например уменьшая рабочую емкость, что приведет к изменению кинетики и предимпульсных значений  $N_{e0}$  и  $N_m$ . Такие расчеты, к сожалению, не проведены, а те, что описаны, например, в [5], не приближают нас к выяснению вопроса о предельной частоте повторения  $f_{\text{lim}}$ .

Кроме того, в работе [5], как, впрочем, и в некоторых других работах, делаются расчеты зависимости энергии генерации от  $N_{e0}$  или  $N_{m0}$ , при этом второй параметр из этой пары фиксируется. Нам уже неоднократно приходилось упоминать (см., напр., [1, 2]), что такие расчеты не соответствуют реальной ситуации в ЛПМ, поскольку в процессе трехчастичной рекомбинации величины  $T_e(t)$ ,  $N_e(t)$  и  $N_m(t)$  взаимозависимы в силу особенности этой рекомбинации. То, что рекомбинация в ЛПМ является трехчастичной, никем не оспаривается. Произвольное независимое изменение упомянутых величин означает отступление от самосогласованного решения, поэтому к результатам таких расчетов надо относиться с большой осторожностью, т. к. они могут приводить к большим ошибкам и только запутывать читателя. Более подробно

этот вопрос предполагается обсудить в дальнейшем, поскольку он касается не только работы [5], но и ряда других работ.

В Заключении работы [5] сделан следующий вывод: «Результаты расчетов подтверждают вывод работы [2] ([3] в настоящей работе. – Г.П.) о том, что для заданной системы накачки имеет место критическая начальная плотность электронов, при превышении которой генерация в ЛПМ срывается. Результаты расчетов согласуются с оценками, предложенными в [2]. Расчеты показывают также, что имеет место и критическая начальная плотность метастабилей. Ограничения, обусловленные большими начальными плотностями электронов и метастабилей взаимосвязаны и могут конкурировать друг с другом».

Таким образом, речь уже идет не о предельно достижимой частоте повторения, а о том, что относится к *заданной системе накачки*. Но такой вывод вряд ли представляет интерес. Очевидно, что всегда можно представить себе такую систему накачки, с помощью которой не удастся нагреть электроны заданной плотности до нужной температуры  $T_e$  (об этом сказано и в нашей работе [4]). Для этого просто нужно иметь низкую скорость ввода энергии в активную среду в начале импульса возбуждения, что нетрудно сделать, выбрав соответствующие параметры элементов системы, медленней коммутирующий элемент и низкое начальное напряжение. При соответствующем выборе системы накачки можно получить согласие почти с любой оценкой  $N_{e\text{cr}}$ .

Сами же формулы (2) и (3) претендуют на большую, чем отмечено в работе [3], общность. При их выводе не были указаны параметры заданной системы накачки. В них не входят характеристики системы накачки, определяющие скорость ввода энергии в начале импульса. Единственный параметр в этих формулах, зависящий от системы накачки, – это  $j_{\text{max}}$ .

Однако, как многократно упоминалось, генерация в типичном случае происходит на фронте импульса тока, а к моменту достижения максимума тока она заканчивается, так что скорость ввода энергии при максимальном токе не может влиять на генерацию в этом импульсе возбуждения, а может влиять только на генерацию в последующих импульсах. Известно также, что  $j_{\text{max}}$  можно легко увеличить, увеличив, например, зарядную емкость, что приводит к росту амплитуды тока и к сдвигу его максимума в сторону больших времен. Однако это не улучшает условия генерации, а наоборот, ухудшает их за счет большего нагрева среды и увеличения  $N_{e0}$  и  $N_{m0}$ . Так что формулы (2) и (3) только дезориентируют разработчиков систем накачки.

Другой вывод в цитированном Заключении сводится к тому, что критическая начальная плотность метастабилей существует, а ограничения, обусловленные большими начальными плотностями электронов и метастабилей, взаимосвязаны и могут конкурировать друг с другом. По нашему мнению, это шаг в правильном направлении. Однако если это признается, то тогда остается вопрос о том, что же реально ограничивает частоту повторения. При этом разговор о том, что  $N_{e0}$  ограничивает достижимую частоту повторения даже при нулевой плотности метастабилей, вряд ли уместен, т. к. это не соответствует реальной ситуации в ЛПМ. Поскольку ограничения взаимосвязаны, их и анализировать надо вместе, с учетом этой взаимосвязи.

#### 4. Заключение

Из изложенного выше следует, что и новые расчеты и аргументы, приведенные в работе [5], не доказывают существования критической плотности электронов, если речь идет о предельно достижимой частоте повторения импульсов и не ограничен выбор системы импульсного питания. Но именно такая проблема и представляет интерес, и о ней велись длительные дискуссии, упомянутые во Введении к работе [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-02-17404).

1. Петраш Г.Г. *Препринт ФИАН № 28* (М., 1999).
2. Petrash G.G. *Laser Phys.*, **10**, 994 (2000)
3. Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **30**, 501 (2000).
4. Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 407 (2001).
5. Бойченко А.М., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **32**, 172 (2002).
6. Yakovlenko S.I. *Laser Physics*, **10**, 1009 (2000).
7. Бойченко А.М., Жданев О.В., Яковленко С.И. *Материалы II Всерос. научной конф. «Молекулярная физика неравновесных систем»* (Иваново, 2000, с.28).
8. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Zhdaneev O.V., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **11**, 580 (2001).