

07;12

Особенности генерации нецепного HF лазера, возбуждаемого электронным пучком

© Н.Г. Иванов, В.Ф. Лосев

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 20 октября 2004 г.)

Приводятся результаты экспериментальных исследований параметров излучения нецепного химического HF лазера с активным объемом 201 при возбуждении пучком ускоренных электронов с различным уровнем вложенной в газ энергии. Показывается, что для эффективной работы лазера уровень вложенной энергии в газ должен быть менее 30 Дж/л. В случае возбуждения с удельной энергией более 60–70 Дж/л наблюдается снижение не только эффективности, но и энергии генерации лазера.

Введение

Нецепные HF/DF химические лазеры являются высокоэффективными источниками когерентного излучения в ближней инфракрасной области спектра ($\lambda = 2.6\text{--}5\ \mu\text{m}$). Большое число спектральных линий лазерного излучения, перекрывающих спектры поглощения многих продуктов загрязнения атмосферы в результате жизнедеятельности человека, делают такие лазеры универсальными источниками излучения в системах для экологии и мониторинга окружающей среды.

Возбуждение нецепных химических лазеров обычно осуществляется электрическим разрядом или пучком ускоренных электронов. Последний является наиболее перспективным для возбуждения рабочей смеси в лазерах с высоким уровнем энергии генерации ($> 100\ \text{J}$). В HF лазерах в качестве рабочей смеси обычно используются газы SF_6 и H_2 [1,2], при этом SF_6 является электроотрицательным газом, обладающим высоким сечением прилипания к молекулам плазменных электронов. В работах [3,4] для смесей, содержащих электроотрицательные газы, были обнаружены аномалии в распространении электронного пучка. Главная из них заключалась в том, что электроны проникали в электроотрицательный газ на глубину, существенно меньшую своего экстраполированного пробега, другими словами, электронный пучок „запирался“. В работе [5] было показано аномальное поведение вложенной энергии при возбуждении SF_6 электронным пучком. Авторы обнаружили, что при давлении SF_6 более $5.5 \cdot 10^4\ \text{Pa}$ область возбуждения становилась меньше расчетной. На основании выполненных расчетов авторы предположили, что аномальное поведение вложенной энергии обусловлено образованием в плазме (из-за малой ее проводимости) большого объемного заряда. В результате электронный пучок как бы запирается полем объемного заряда, поскольку большая доля энергии электронов тратится на работу против этого поля.

В силу этой ситуации аномальное поведение вложенной энергии в рабочую смесь может сказываться на па-

раметрах химического лазера. В работе [6] исследовался цепной химический лазер на смеси $\text{F}_2\text{--O}_2\text{--H}_2\text{--SF}_6$, возбуждение которого осуществлялось микросекундным электронным пучком с максимальной энергией электронов в диоде 450 кэВ. При этом были определены условия, когда запирающее электронного пучка влияло на параметры генерации. Было показано, что линейный рост удельной энергии генерации при увеличении удельной энергии возбуждения E нарушался при величине $E > 50\ \text{J/l}$. Для смеси $\text{H}_2\text{--SF}_6$ наблюдалось сокращение области генерации с увеличением плотности смеси более 3.5 г/л.

С другой стороны, в работах [7,8] при возбуждении смеси $\text{H}_2\text{--SF}_6$ радиально сходящимся с четырех сторон электронным пучком была получена высокая эффективность генерации $\sim 10\%$, и, по мнению авторов, роль объемного заряда в работе лазера была незначительна [8].

В связи с противоречивыми данными о наличии и влиянии объемного заряда на параметры генерации HF лазера представляет интерес проведение более детальных исследований данного лазера. В настоящей работе исследуются энергетические и временные параметры излучения нецепного HF лазера в зависимости от плотности энергии накачки электронного пучка с целью определения наличия аномалий в поведении параметров излучения и поиска оптимальных условий возбуждения.

Аппаратура и методики эксперимента

Эксперименты проводились на установке, ранее использованной нами для возбуждения XeCl лазера [9]. Установка имеет лазерную камеру, два вакуумных диода, расположенных с двух сторон от камеры, и шесть генераторов Аркадьева–Маркса. Каждый диод питался от трех параллельно соединенных генераторов, имеющих по десять ступеней (емкость одной ступени $0.1\ \mu\text{F}$). Взрывозащитный катод диода был выполнен из графитовых стержней. Зарядное напряжение генераторов было 80 кВ. Максимальная энергия электронов в вакуум-

ном диоде составляла 450 kV, ток — 40 kA, длительность импульса тока — 800 ns. Электронный пучок каждого диода сечением 13×150 см инжектировался в лазерную камеру через 50 μm титановую фольгу или лавсановую пленку, расположенную на металлической решетке, которая выполняла функцию анода в вакуумном диоде. Расстояние между противоположными фольгами в лазерной камере было 12 см. Лазерная камера имела цилиндрическую форму с общим объемом 60 л. Резонатор лазера образовывался окнами лазерной камеры ($\varnothing 20$ см, TiBr, коэффициент пропускания 75% в области 2.5–3 μm) и плоским внешним алюминиевым зеркалом. В качестве лазерной смеси использовались газы H_2 и SF_6 при давлении смеси 0.3–1 atm.

При возбуждении HF лазера нами изменялась плотность энергии (мощность) накачки. Это осуществлялось несколькими способами. Во-первых, на величину вложенной в газ энергии существенно влияла используемая фольга. Так, замена титановой фольги на лавсановую пленку примерно в полтора раза повышала уровень вложенной энергии. Во-вторых, исследовалась генерация лазера при его возбуждении от одного либо от двух диодов. Это тоже позволяло изменять энергию накачки примерно вдвое. И в-третьих, плотность энергии накачки варьировалась путем изменения давления лазерной смеси от 0.3 до 1 atm, что также позволяло изменять уровень возбуждения примерно в два раза.

Распределение плотности энергии лазерного излучения по сечению пучка измерялось калориметром ИКТ-1Н, полная энергия генерации — набором соединенных вместе калориметров ТПИ2-7 с общей площадью 24×24 см. Форма импульса излучения регистрировалась фоторезистором ФСГ-22 с помощью осциллографа С8-14. Энергия, вложенная в газ электронным пучком, рассчитывалась и измерялась экспериментально. Измерение осуществлялось методом скачка давления в газообразном SF_6 . При этом в качестве датчика использовался механотрон 6МД-Х1Б, сигнал с которого подавался на осциллограф. Расчет вложенной энергии осуществлялся методом Монте-Карло без учета влияния на электроны поля объемного заряда в плазме. Параметры лазерного излучения регистрировались в первом выстреле на новой смеси газов, поскольку во втором выстреле энергия генерации снижалась в 1.5–2 раза.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены зависимости энергии электронного пучка, вложенной в газ, при изменении давления SF_6 для односторонней и двухсторонней накачки. С ростом давления от 0.3 до 0.95 atm вложенная энергия увеличивалась примерно вдвое и наблюдалось некоторое его насыщение. Замена титановой фольги на лавсановую пленку приводила к увеличению энергии накачки в 1.6 раза.

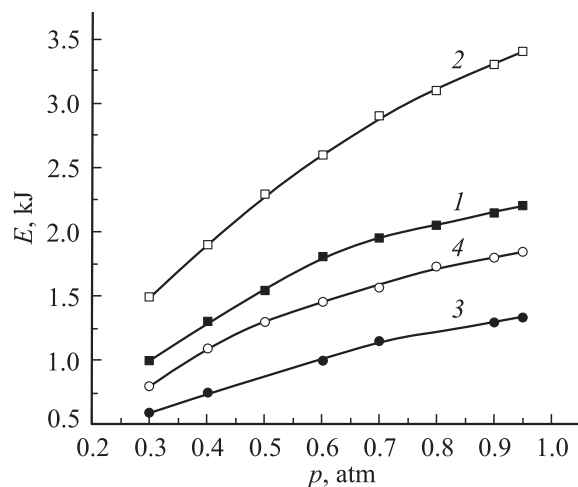


Рис. 1. Зависимость вложенной в газ (SF_6) энергии электронного пучка от давления с титановой фольгой (1, 3) и лавсановой пленкой (2, 4). 1, 2 — накачка с двух сторон, 3, 4 — с одной стороны.

На первом этапе наших исследований была проведена оптимизация соотношения компонент смеси SF_6 и H_2 в зависимости от ее давления и плотности энергии накачки. На рис. 2 приведено поведение плотности энергии генерации с квадратного сантиметра в зависимости от состава смеси при ее возбуждении электронным пучком с одной стороны. Видно, что при изменении соотношения компонент смеси $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = (20-100) : 1$ плотность энергии практически не изменяется как в областях у фольги, где реализуется повышенная плотность накачки,

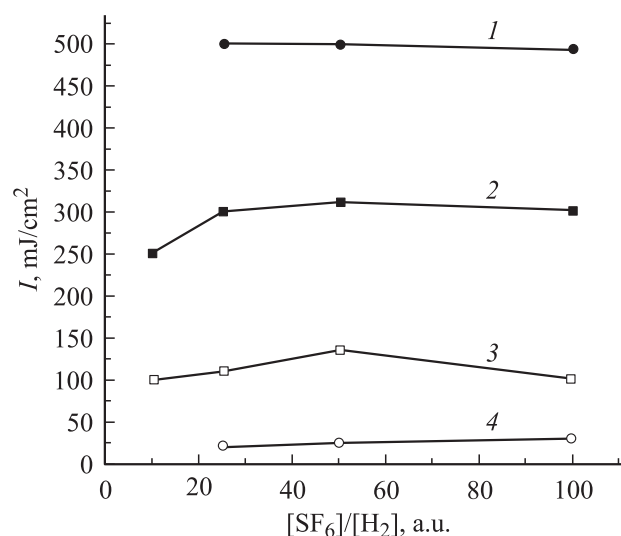


Рис. 2. Зависимость плотности выходной энергии излучения от соотношения концентраций SF_6/H_2 при возбуждении одним электронным пучком через титановую фольгу смеси с давлением 0.5 (2, 3) и 1 atm (1, 4). 1, 2 — измерение на расстоянии от фольги, через которую инжектировался пучок, 2 см; 3, 4 — 10 см.

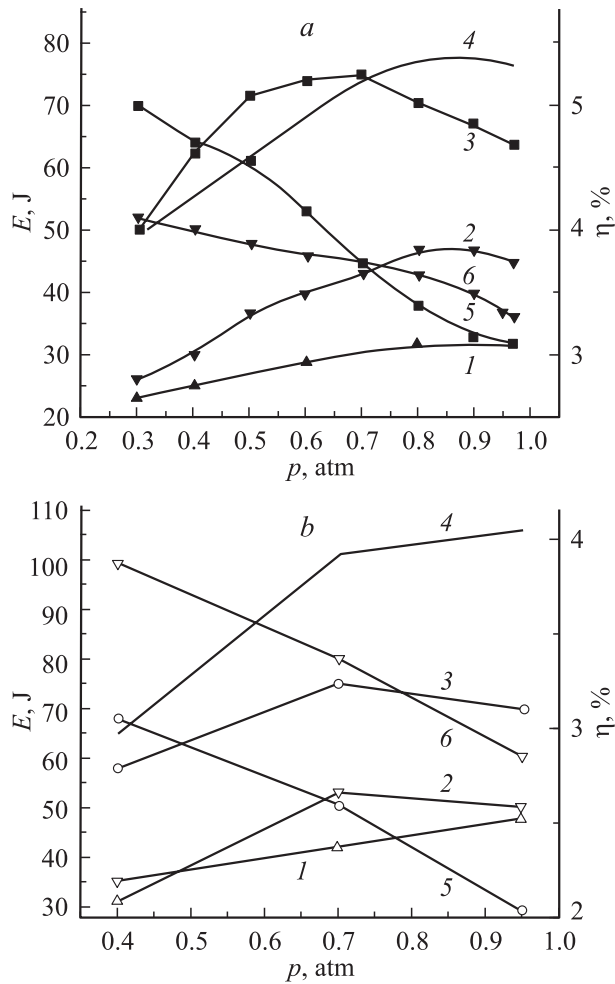


Рис. 3. Зависимость энергии (1–4) и эффективности (5, 6) генерации от давления смеси с титановой (а) и лавсановой (б) фольгами при возбуждении электронным пучком с одной стороны (1), с другой стороны (2, 6) и одновременно с двух сторон (3, 5). 4 — сумма энергий кривых 1 и 2.

так и вдали от нее (пониженная плотность), как для давления 0.5, так и 1 atm. Это означает, что в широком диапазоне наших экспериментальных условий можно использовать одно и то же соотношение компонент смеси. В связи с этим все последующие эксперименты проводились на смеси $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 50 : 1$.

В первой серии экспериментов электронный пучок инжестировался в лазерную камеру через титановую фольгу. При этом сравнивались параметры лазерного излучения для случаев возбуждения с одной или двух сторон. Поскольку параметры двух диодов были близки друг к другу, то включение второго рода означало повышение энергии накачки примерно в два раза. Поведение энергии генерации в зависимости от давления смеси для этих случаев приведено на рис. 3, а. Здесь же приведен расчет для энергии излучения, полученной как сумма энергий от первого и второго пучков накачки, работающих раздельно (4). Видно, что поведение энергии из-

лучения для двухсторонней накачки (3) можно считать нормальным в диапазоне давлений смеси 0.3–0.7 atm. Для давления более 0.7 atm появляется ненормальное поведение энергии (ее уменьшение с ростом давления). Эта ненормальность заключается, во-первых, в том, что энергия генерации уменьшается при росте вложенной в газ энергии пучка вплоть до 1 atm. Во-вторых, в том, что она уменьшается при росте энергии излучения от каждого пучка накачки в случае раздельной их работы (1, 2).

Безусловно, представляет интерес распределение плотности энергии генерации по сечению лазерного пучка для различных давлений. Регистрация автографа излучения на термобумаге показала, что при давлении 0.5 atm энергия примерно равномерно распределяется по всему сечению 12×12 см, хотя на автографе наблюдались некоторые локальные пятна с большей и меньшей плотностью. При повышении давления до 1 atm в центральной части лазерного пучка плотность энергии понижалась (рис. 4).

Количественные измерения плотности энергии генерации проводились как при одностороннем, так и при двухстороннем возбуждении. На рис. 3, б приведено распределение плотности энергии между титановыми фольгами для двухсторонней накачки и трех давлений смеси. Из рисунка видно, что для всех давлений распределение достаточно однородно. Максимальная плотность энергии наблюдалась для давления смеси 0.7 atm, так же как и для полной энергии генерации. Снижение плотности энергии при увеличении давления до 0.9 atm наблюдалось как в центре, так и в области фольг. Таким образом, поведение плотности энергии генерации для давления смеси более 0.7 atm, так же как и для полной энергии, можно назвать в нашей терминологии ненормальным.

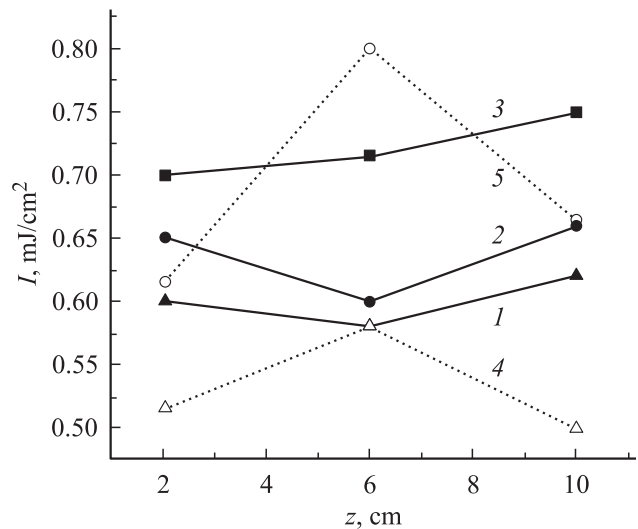


Рис. 4. Распределение плотности выходной энергии излучения при двухсторонней накачке (1–3) и сумма энергий генерации от двух диодов при односторонней накачке (4, 5) для смеси с давлением 0.5 (1, 4), 0.9 (2) и 0.7 atm (3, 5).

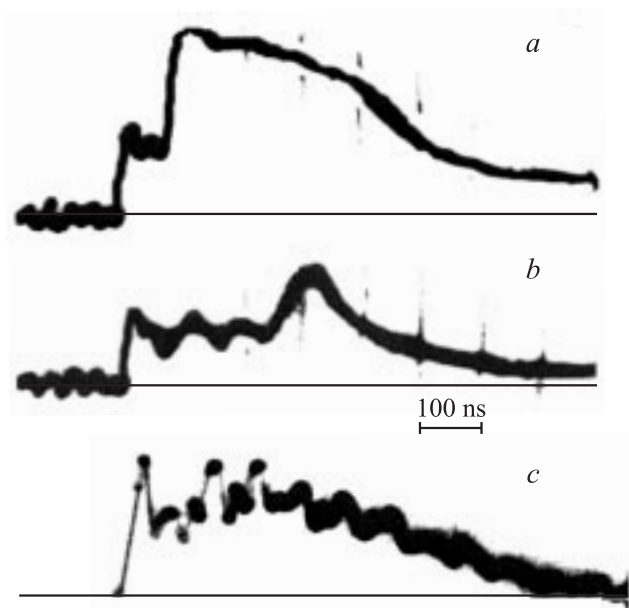


Рис. 5. Осциллограммы импульсов излучения лазера в первом (*a, b*) и во втором (*c*) импульсе в центре лазерного пучка (*a, b*) и на его краю (*c*). Давление смеси 0.7 atm, возбуждение с двух сторон через титановую фольгу.

Исследование поведения энергии генерации при повышении уровня накачки в 1.6 раз (лавсановая пленка) показало, что общий уровень энергии практически не увеличился (рис. 3, *b*). При этом расчетная сумма энергий, полученных при работе каждого диода отдельно, превышала экспериментальный уровень энергии при двухстороннем возбуждении уже для всего диапазона давлений от 0.4 до 0.95 atm. Другими словами, ненормальная область поведения энергии генерации (превышение расчетной энергии над экспериментальной) расширилась и сместилась в сторону меньших давлений.

Эффективность генерации, рассчитанная как отношение лазерной энергии к вложенной, всегда повышалась при уменьшении уровня накачки (рис. 3). Это наблюдалось как при уменьшении давления смеси, так и при переходе от лавсановой пленки к титановой фольге. Наибольшая эффективность генерации от вложенной энергии (5%) была получена с титановой фольгой при возбуждении с двух сторон смеси с давлением 0.3 atm. Следует отметить, что при давлении смеси более 0.7 atm с титановой фольгой эффективность генерации при одностороннем возбуждении становилась выше, чем при двухстороннем возбуждении.

На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов лазерного излучения для первого и второго выстрелов на одной лазерной смеси при использовании титановой фольги. Видно, что импульс во втором выстреле существенно изменяется по форме.

Обсуждение результатов

Итак, основной особенностью, которую можно выделить из совокупности наших экспериментальных данных, является наличие факта снижения или непропорционального увеличения энергии генерации при увеличении уровня мощности накачки. Это хорошо видно из рис. 1 и 3. Рис. 1 показывает, что с ростом давления до 1 atm вложенная в газ энергия возрастает для всех условий эксперимента, двухсторонняя инжекция пучка повышает вложенную энергию примерно вдвое и, наконец, замена титановой фольги на лавсановую пленку приводит к увеличению энергии накачки в 1.6 раза. При нормальной зависимости энергии генерации от вложенной энергии во всех этих случаях она должна была пропорционально увеличиваться. Но что же мы видим из рис. 3? При превышении давления 0.7 atm уровень энергии генерации при двухстороннем возбуждении с лавсановой пленкой и титановой фольгой начинает уменьшаться (кривые 3). При замене титановой фольги на лавсановую пленку при односторонней накачке максимальная энергия генерации выросла всего с 45 до 50 J (кривые 2), а при двухстороннем возбуждении максимальный уровень энергии генерации остался тот же — 75 J (кривые 3), т.е. замена титановой фольги на лавсановую пленку и переход на двухстороннюю накачку не дают ожидаемого повышения энергии генерации.

Эта особенность, скорее всего, связана с образованием в плазме большого объемного заряда, о котором говорится в работах [5,6]. Действительно, при инжекции электронного пучка в газ с зарядом q , согласно уравнению непрерывности, которое говорит о сохранении заряда в окрестности любой точки, из образованной плазмы должен выйти такой же заряд q . Эти электроны будут двигаться под действием электрического поля, возникшего при наличии в плазме объемного заряда q . В обычных газах за счет высокой концентрации плазменных электронов проводимость плазмы достаточно высока и электрическое поле объемного заряда достаточно мало. Так, при возбуждении электронным пучком KrF лазера в работе [10] расчетная величина электрического поля составляла 0.8–1 kV/cm (потенциал в центре лазерной камеры диаметром 20 см не превышает ~ 10 kV). Это поле будет тормозить движение быстрых электронов в активном объеме. Но поскольку энергия электронов в реальных эксимерных лазерах обычно составляет 300–500 keV, то потери энергии электронов на работу против этого поля являются достаточно малыми. Отметим, что в смеси KrF лазера содержание электроотрицательного газа (F_2) составляет около 0.1%, в то время как в HF лазере содержание электроотрицательного газа (SF_6) составляет 98%. Таким образом, в смеси SF_6-H_2 за счет высокой концентрации SF_6 скорость прилипания плазменных электронов будет примерно на три порядка выше, чем в смеси эксимерного лазера. Следовательно, проводимость плазмы будет существенно меньше, а электрическое поле будет существенно выше, чем в

эксимерных лазерах. При этом проводимость плазмы может обеспечиваться как электронами, так и ионами. Торможение быстрых электронов под действием образующегося пространственного заряда означает переход части кинетической энергии пучка в потенциальную энергию электрического поля. Далее эта энергия не может бесследно исчезнуть, она будет растрачиваться на движение тяжелых ионов и электронов, которые не достигают достаточной энергии для возбуждения и ионизации компонент лазерной смеси, и их энергия будет уходить просто в тепло.

На наш взгляд, в наших экспериментах реализовались условия, при которых влияние объемного заряда становилось столь существенным, что заметно снижалась энергия генерации лазера. Эти условия наиболее сильно проявлялись при давлении лазерной смеси более 0.7 atm с титановой фольгой и более 0.3 atm с лавсановой пленкой (рис. 3). Именно с этих давлений экспериментальная энергия генерации при двухсторонней накачке становилась меньше расчетной (как сумма энергий генерации от каждого пучка). При этом в обоих случаях средняя величина вложенной в газ удельной энергии была примерно одинаковой и составляла 60–70 Дж/л. Следовательно, можно считать, что для наших экспериментальных условий этот уровень энергии является некоторым критическим уровнем, при котором образованный в плазме объемный заряд начинает существенно влиять на эффективность и энергию генерации лазера. Соответственным образом можно ввести критическую величину удельного заряда, вносимого электронным пучком, в нашем случае его величина составляет $3-3.5 \cdot 10^{-4}$ Кл.

Максимальная эффективность генерации лазера 5% наблюдалась с титановой фольгой при двухсторонней накачке и давлении смеси 0.3 atm (рис. 3, а). При односторонней накачке эффективность генерации для этого же давления снижалась до 4% (за счет ухудшения однородности возбуждения). При давлении смеси более 0.7 atm эффективность для односторонней накачки становилась выше, чем для двухсторонней накачки. Возможно, это происходило за счет увеличения роли объемного заряда. Повышение мощности накачки с лавсановой пленкой снижало эффективность до 3%. С ростом давления во всех экспериментах эффективность генерации лазера снижалась. Это, скорее всего, говорит о том, что влияние объемного заряда у нас наблюдалось с титановой фольгой и при давлениях 0.3–0.4 atm, но оно было более слабое, чем при более высоких давлениях.

К особенностям данного лазера также можно отнести поведение импульса излучения во времени. Как правило, он состоял как бы из двух импульсов, сдвинутых во времени (рис. 5). При включении лазера второй раз на той же смеси момент появления второго импульса становился более поздним. Мы не знаем точной природы возникновения такой формы импульса, однако, возможно, это связано с включением дополнительного канала образования молекул HF при участии молекулярного фтора [7,8].

Заключение

Проведенные исследования энергетических параметров HF лазера в зависимости от плотности вложенной энергии (мощности накачки) электронного пучка показали, что превышение уровня накачки 60–70 Дж/л приводит к снижению или непропорциональному росту энергии генерации. При уровнях накачки лазера более 30 Дж/л наблюдалось уменьшение эффективности генерации лазера для всех экспериментальных условий. Скорее всего, для реализации более высокой эффективности генерации при возбуждении лазера необходимо использовать меньшую плотность тока пучка (меньшую плотность вложенной энергии) при той же энергии электронов. Этот вывод подтверждается ранее полученными результатами, приведенными в цитируемых работах, когда при пониженной плотности электронного пучка лазер работал с высокой эффективностью без каких-либо отклонений от нормы [8], а при повышенных плотностях тока авторы наблюдали ненормальное поведение электронного пучка в газе и параметров генерации лазера [5,6].

Список литературы

- [1] *Gastaud M., Bouesc J., Autric M.* // Proc. SPIE. 1996. Vol. 3092. P. 585–588.
- [2] *Абдуллин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М.* и др. // Письма ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 5. С. 58–65.
- [3] *Грабовский Е.В., Денисенко В.П., Животов В.К.* и др. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 10. С. 2224–2226.
- [4] *Ramirez I.I., Prestwich K.R., J.* // Appl. Phys. 1979. Vol. 50. № 7. P. 4988–4995.
- [5] *Башиурин В.П., Великанов С.Д., Довгий А.Я.* и др. // ДАН СССР. 1986. Т. 287. № 3. С. 614–618.
- [6] *Великанов С.Д., Синицин М.В., Урлин В., Д.* и др. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 1. С. 25–28.
- [7] *Орловский В.М., Пономаренко А.Г., Соснин Э.Ф.* и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 1. С. 76–81.
- [8] *Ерофеев М.Е., Орловский В.М., Скакун В.С.* и др. // Квантовая электрон. 2000. Т. 30. № 6. С. 486–488.
- [9] *Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* и др. // Квантовая электрон. 1990. Т. 17. № 3. С. 300–302.
- [10] *Ken-Ichi Ueda.* // Laser and Particle Beams. 1989. Vol. 7. Pt 3. P. 375–382.