

02;03

Эффективные HF (DF)-лазеры с накачкой нецепной химической реакцией, иницируемой самостоятельным разрядом

© А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 10 ноября 2003 г.

Исследованы режимы накачки электроразрядных нецепных HF (DF)-лазеров при использовании индуктивных и емкостных накопителей энергии. Определены оптимальные условия возбуждения. Созданы электроразрядные HF- и DF-лазеры с высокой удельной энергией излучения, а также высокими внутренним (относительно вложенной энергии) КПД ~ 10 и $\sim 7\%$ и техническим (относительно запасаемой в первичном накопителе энергии) КПД ~ 6 и $\sim 5\%$ соответственно.

Нецепные HF (DF)-лазеры [1–12] продолжают в настоящее время интенсивно исследоваться. Одна из задач, которая требует решения, это увеличение технического КПД наиболее простых и удобных для практического применения HF- и DF-лазеров с накачкой самостоятельным разрядом при высокой удельной энергии излучения. Максимальный технический КПД нецепного электроразрядного HF-лазера ($\sim 6\%$) был получен в смесях элегаза с водородом при накачке коротким (20 ns) импульсом от полосковой линии [1]. Однако удельная и полная энергии излучения были небольшими, 0.7 J/l и 0.14 J соответственно. Увеличение длительности импульса накачки в [1] приводило к быстрому падению КПД. В лучших нецепных электроразрядных лазерах при энергии излучения более 1 J технический КПД составляет $\sim 4\%$ для HF-лазера [6,8,9,12] и $\sim 3\%$ для DF-лазера [8] при удельной энергии излучения до 7 J/l (50 J/l · atm). Применение более сложной установки с фотоиницированием разряда рентгеновским излучением в смеси SF₆–C₂H₆ позволило повысить удельную энергию излучения до 9 J/l и технический КПД HF-лазера до 4.7% [7]. В [2] сообщалось о повышении энергии излучения HF-лазера до 0.5 J (6 J/l) и внутреннего КПД до 5%

при добавках к смесям элегаза с водородом небольшого количества пропана. Увеличение характеристик лазера было достигнуто за счет улучшения однородности разряда.

Целью данной работы является определение условий накачки, обеспечивающих одновременно максимальную эффективность электро-разрядных нецепных HF- и DF-лазеров и высокие удельные энергии излучения.

Возбуждение рабочих смесей осуществлялось самостоятельным разрядом от индуктивного или LC-генераторов с величиной накопительного конденсатора $C = 13-70$ нФ. Зазор между профилированными электродами длиной 70 см, обеспечивающими однородное электрическое поле в лазерном промежутке, составлял 3.8 см. Предыонизация осуществлялась излучением искровых промежутков, расположенных вдоль одного электрода (катода или анода). В ряде экспериментов предыонизация отключалась. Резонатор был образован плоскими алюминиевым зеркалом и пластинками из КРС-5 или КРС-6. Ширина лазерного пучка на выходе из резонатора в зависимости от используемой смеси составляла 0.4–1 см. Конструкция лазера и методики измерений подробно описаны в [12]. Характеристики разряда и лазерной генерации изучались в смесях элегаза с пентаном, водородом и дейтерием при давлениях 0.03–0.12 atm.

В ходе исследований были определены основные факторы, влияющие на устойчивость разряда, энергетические параметры и эффективность HF и DF-лазеров.

1. Однородность электрического поля в разрядном промежутке лазера. Этот параметр наиболее важен при использовании смесей с водородом, в которых получены наибольшие эффективности излучения. При замене профилированных электродов на электроды с цилиндрической поверхностью и максимальной энергии, запасенной в накопительной емкости, энергия генерации уменьшилась в несколько раз даже в смесях с пентаном. В этих условиях на интегральных фотографиях разряда были видны многочисленные искровые каналы. Дополнительным критерием однородности разряда служил характер протекания тока через лазерный промежуток. При формировании объемного разряда в рабочей смеси (режим задавался подбором напряжения на накопительном конденсаторе $C = 70$ нФ) ток разряда прекращался примерно через 100 ns и на лазерном промежутке оставалось достаточно высокое напряжение. При образовании каналов в промежутке разрядный ток уве-

личивался, напряжение на промежутке уменьшалось и режим разряда становился колебательным [11].

2. *Предыонизация.* Измерения показали, что при наличии предыонизации энергия генерации в смесях с водородом возрастает на 10–70%. В отсутствие предыонизации разряд возникал в локальных областях, а затем заполнял всю рабочую поверхность электрода. При низком зарядном напряжении разряд состоял из одного или малого числа диффузных каналов, которые замыкались на яркие катодные пятна. В случае смесей с пентаном эффект предыонизации наблюдался только при малых напряжениях накопительного конденсатора и соответственно малых удельных энерговкладах $< 20 \text{ J/l}$. При увеличении энерговклада за счет увеличения зарядного напряжения накопительного конденсатора, подобно [6,8,12], разряд оставался однородным, в том числе и без предыонизации.

3. *Состав рабочей смеси и удельный энерговклад.* Сравнение энергии генерации в различных смесях показало, что при оптимизации условий накачки, как мы уже отмечали, максимальная эффективность работы нецепных лазеров достигается в смесях $\text{SF}_6\text{--H}_2$ (D_2). При нарушении однородности электрического поля в разрядном промежутке, увеличении длительности импульса накачки или отсутствии подсветки использование пентана дает выигрыш в энергии генерации.

На рис. 1 приведена зависимость внутреннего КПД HF-лазера от удельного энерговклада, полученная при накачке смесей $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 8 : 1$ от различных LG-генераторов. При этом давление смеси и зарядное напряжение подбирались так, чтобы остаточное напряжение на накопительном конденсаторе было близко к нулю. Максимальный внутренний КПД (9–10%) наблюдался с накопительным конденсатором $C = 13\text{--}39 \text{ nF}$ при вкладываемой энергии 30–70 J/l (удельная энергия излучения 3–7 J/l). Оптимум по удельной энергии накачки в этой области был зафиксирован нами ранее в лазере с активной длиной 20 см [4]. Внутренний КПД HF (DF)-лазеров ~ 10 (7)% был также получен при накачке от емкостного генератора и при $C = 70 \text{ nF}$, но только при низком зарядном напряжении. Технический КПД при таком режиме возбуждения не превышал 1% из-за неполного разряда накопительного конденсатора. Отметим, что, подобно [2], мы получили увеличение энергии генерации в тройной смеси при малых добавках пентана (~ 10)% в смесь $\text{SF}_6\text{--H}_2$. Максимальная энергия излучения в смеси $\text{SF}_6\text{--H}_2\text{--C}_5\text{H}_{12}$ составила $Q = 1.9 \text{ J}$ ($\sim 8 \text{ J/l}$). Добавки углеводородов,

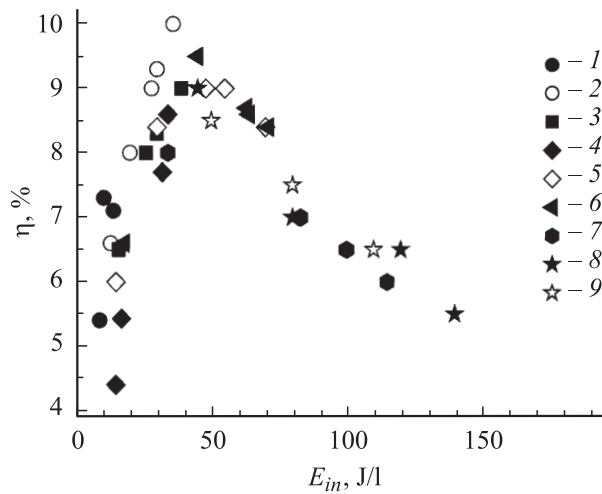


Рис. 1. Зависимость внутреннего КПД электроразрядного HF-лазера от удельной энергии накачки смеси SF_6 : $\text{H}_2 = 8:1$ при различных давлениях от емкостного накопителя с $C = 13\text{--}70$ нФ: 1 — $C = 13$ нФ, $p = 13.5$ Torr; 2 — $C = 13$ нФ, $p = 27$ Torr; 3 — $C = 13$ нФ, $p = 40.5$ Torr; 4 — $C = 26$ нФ, $p = 27$ Torr; 5 — $C = 26$ нФ, $p = 40.5$ Torr; 6 — $C = 39$ нФ, $p = 40.5$ Torr; 7 — $C = 70$ нФ, $p = 40.5$ Torr; 8 — $C = 70$ нФ, $p = 54$ Torr; 9 — $C = 70$ нФ, $p = 67$ Torr.

как отмечено выше, повышают устойчивость разряда при повышении энерговклада.

При накачке от индуктивного накопителя энергии (длительность импульса возбуждения 100 ns или менее) внутренний КПД HF-лазера достигал 10% при энергии излучения $Q = 1.4$ J (удельная энергия излучения до 6.5 J/l). Для DF-лазера получен внутренний КПД до 7% при $Q = 1.2$ J (удельная энергия генерации ~ 5 J/l). В этих условиях за счет увеличения мощности накачки высокий внутренний КПД был получен как при низких (~ 10 J/l), так и при максимальных энерговкладах (до 50 J/l).

4. *Длительность импульса накачки.* Этот параметр имеет большое влияние на рабочие характеристики нецепных электроразрядных HF (DF)-лазеров. При длительности накачки 100 ns и менее максимальные энергия излучения и КПД были получены в смесях с водородом, а для импульсов возбуждения с длительностью более 200 ns — в смесях

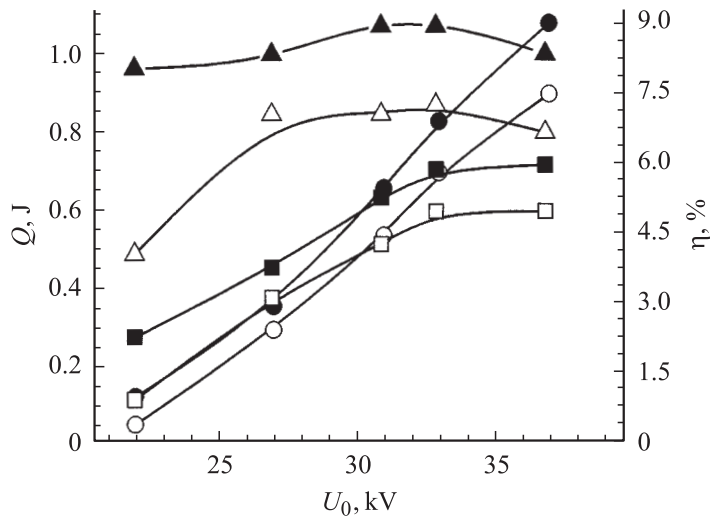


Рис. 2. Зависимости энергии излучения (кружки), технического (квадраты) и внутреннего (треугольники) КПД HF- (сплошные символы) и DF- (полые символы) лазеров от зарядного напряжения емкостного накопителя $C = 26$ nF. Смеси $SF_6 : H_2(D_2) = 8 : 1$, $p = 40.5$ Torr.

с углеводородами. В наших экспериментах при увеличении длительности тока разряда в смесях с водородом со 100 до 250 ns наблюдалось двукратное падение энергии излучения. В работе [1] существенное уменьшение эффективности генерации было получено при длительности импульса накачки более 20 ns. В широкоапертурных лазерах падение устойчивости разряда наблюдалось в смесях с углеводородами [8] и дейтерием [5] при длительности накачки более 200–300 ns.

Снятые нами фотографии интегрального свечения разряда, а также осциллограммы тока через лазерный промежуток и напряжения не фиксировали нарушения однородности разряда при увеличении длительности накачки (более 100 ns). Можно предположить, что в смесях на основе SF_6 с увеличением длительности импульса тока характер разряда изменяется и появляется множество тонких каналов, в которых низка эффективность образования атомарного фтора и которые неразличимы на интегральных фотографиях. Как известно, наработка атомарного фтора определяет параметры нецепного химического лазера. Образование

микроканалов, как известно, ограничивает длительность импульса излучения в электроразрядных эксиплексных лазерах [13]. В пользу этого предположения говорит следующий факт. Эффективность HF-лазеров с накачкой пучком электронов, обеспечивающей однородный энерговклад (нет контрагирования разряда), не снижается при увеличении длительности импульса накачки. Так, при накачке пучком электронов с длительностью импульса на полувысоте 120 ns [3] и 300 ns [10] в смесях с водородом был получен одинаковый внутренний КПД $\sim 10\%$.

Проведенные исследования режимов накачки позволили существенно повысить внутреннюю эффективность нецепных HF- DF-лазеров, а также удельные характеристики излучения при высоком техническом КПД. На рис. 2 приведены зависимости энергии генерации и эффективности нецепных HF- и DF-лазеров от зарядного напряжения емкостного накопителя $C = 26$ nF. Максимальный технический КПД составил ~ 6 и $\sim 5\%$, максимальная энергия генерации ~ 1.1 и ~ 0.9 J при максимальной удельной энергии излучения ~ 6 J/l (~ 110 J/l · atm) и 5 J/l (~ 90 J/l · atm) соответственно. При $C = 39$ nF энергия излучения HF-лазера возрастала до 1.4 J при сохранении технического КПД на уровне 6%. При этом спектр генерации HF–DF-лазеров состоял из 30–40 колебательно-вращательных линий молекул HF (DF) и наблюдались интенсивные каскадные переходы [12].

Таким образом, в ходе проведенных исследований определены оптимальные параметры и условия накачки нецепных HF (DF)-лазеров, обеспечивающие предельную эффективность при высоких удельных энергиях излучения. Разработаны нецепные электроразрядные HF- и DF-лазеры с энергией генерации более 1 J, удельной энергией излучения до 6 J/l (> 100 J/l · atm) и техническим КПД ~ 6 и $\sim 5\%$ соответственно.

Список литературы

- [1] Midorikava K., Sumida S., Sato Y. et al. // IEEE J. of Quant. Electron. 1979. V. 15. N 3. P. 190–194.
- [2] Баранов В.Ю., Высикайло Ф.И., Демьянов А.В. и др. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 6. С. 1173–1178.
- [3] Аболенцев В.А., Недосеев Г.Л., Русанов В.Д. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 2. С. 218–219.
- [4] Горюнов Ф.Г., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 12. С. 1148–1150.

- [5] *Anderson N., Bearpark T., Scott S.J.* // Appl. Phys. B. 1996. V. B63. N 6. P. 565–573.
- [6] *Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н.* // Квантовая электроника 1998. Т. 25. № 2. С. 123–125.
- [7] *Richeboeuf L., Pasquiers S., Doussiet F., Legentil M. et al.* // Appl. Phys. B. 1999. V. B68. N 1. P. 45–53.
- [8] *Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф. и др.* // Изв. РАН Сер. Физ. 2000. Т. 64. № 7. С. 1439–1445.
- [9] *Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д. и др.* // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. С. 225–228.
- [10] *Ерофеев М.В., Орловский В.М., Скакун В.С. и др.* // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 6. С. 486–488.
- [11] *Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Панченко А.Н.* // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 12. С. 1035–1037.
- [12] *Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х.* // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 5. С. 401–407.
- [13] *Osborne M.R., Hutchinson M.H.R.* // Appl. Phys. 1986. V. 59. N 3. P. 711–715.