

04:07;12

Эффективный нецепной HF лазер, возбуждаемый самостоятельным разрядом

© А.Н. Панченко, В.М. Орловский, В.Ф. Тарасенко

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

(Поступило в Редакцию 6 мая 2002 г.)

Исследованы генерация и разряд в смесях SF₆ с водородом и углеводородами. Показано, что при инициировании химической реакции самостоятельным разрядом как от генератора с индуктивным накопителем энергии, так и с емкостным, максимальные эффективности генерации достигаются при высоких значениях параметра E/p (E — напряженность электрического поля, p — давление смеси), использовании профилированных электродов и предыонизации разрядного промежутка. Впервые для нецепного HF лазера получены эффективность генерации от вложенной энергии $\sim 10\%$. КПД от запасаемой энергии составил 4.5% при удельной энергии излучения $\sim 140 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$. Показано, что в режиме высоких КПД спектр генерации нецепного HF лазера существенно расширяется и реализуется каскадная генерация на колебательных переходах $P(3-2) \rightarrow P(2-1) \rightarrow P(1-0)$ на ряде вращательных линий.

1. HF и DF лазеры с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой самостоятельным разрядом в одиночном и импульсно-периодическом режимах, интенсивно исследуются в связи с высокими энергетическими характеристиками излучения в ИК области спектра [1–9]. Однако КПД электроразрядного нецепного HF лазера от запасаемой в емкостном накопителе энергии, как правило, не превышают 3–4%, а удельные энергии излучения $\sim 70 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$. В [3,7] при использовании для возбуждения нецепного HF лазера генератора с индуктивным накопителем энергии был получен КПД генерации 5.5%, в том числе и при сравнительно больших удельных энергетических параметрах ($\sim 1.7 \text{ kJ/l} \cdot \text{atm}$). Применение для накачки разряда, инициируемого рентгеновским излучением, при E/p , превышающем статическое пробивное, позволило получить при относительно малых удельных энергетических параметрах ($\sim 0.2 \text{ kJ/l} \cdot \text{atm}$ без учета давления буферного газа неона) в смесях с H₂ эффективность генерации от вложенной энергии $\sim 8\%$ [4]. В [7] нами были получены высокие энергетические параметры излучения HF лазера при использовании индуктивного накопителя энергии и интенсивной предыонизации в смесях как с углеводородами, так и с водородом и рекомендовалось для получения максимальных энергетических характеристик лазеров данного типа применять профилированные электроды.

В данной работе реализованы эффективные режимы накачки нецепного HF лазера от индуктивного и емкостного накопителей. Впервые для электроразрядного HF лазера получен КПД генерации от вложенной энергии $\sim 10\%$. Удельная энергия излучения составила $\sim 140 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$, а КПД лазера от запасаемой энергии — 4.5%.

2. В экспериментах использовался лазер с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока, подробно описанный в [9]. Зазор

между профилированными электродами длиной 70 см равнялся 2 или 3.8 см. Активный объем в обоих случаях составлял 200 cm^3 . Предыонизация от 72 искровых промежутков, равномерно расположенных с двух сторон анода, обеспечивали равномерное облучение катода. Величина обострительных конденсаторов равнялась 2.2 nF, а накопительная емкость была уменьшена до 70 nF. При этом длительность тока разряда была около 100 ns. Индуктивный накопитель мог легко отключаться, длительность накачки при этом возрастала до 200 ns. Характеристики генерации излучались при давлениях 0.02–0.2 atm в смесях SF₆ с пентаном или водородом.

3. Энергия излучения лазера с зазором 2 см не превышала 0.4 J при работе как с индуктивным накопителем, так и без него. Разряд был очень неоднороден, при отключении индуктивного накопителя контрагирование могло наступать уже через 100 ns после пробоя промежутка.

Существенное улучшение лазерных параметров было получено при увеличении зазора до 4 см. При использовании емкостного накопителя в смесях с водородом энергия излучения была более 1 J, а в смесях с пентаном достигала 1.4 J при КПД от запасаемой энергии 4.5% и удельной энергии генерации до $140 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$. После окончания импульса тока на промежутке, как и в [7], регистрировалось остаточное напряжение, однако за счет применения профилированных электродов и однородной предыонизации катода повторный пробой разрядного промежутка отсутствовал, а оставшаяся в конденсаторе энергия выделялась в зарядном сопротивлении в течение длительного времени (сотни μs).

При работе с индуктивным накопителем энергия излучения и КПД лазера не превышала 0.9 J из-за неоптимальной работы полупроводникового прерывателя тока. Во всех случаях разряд был совершенно однороден с большим количеством ярких пятен небольшого раз-

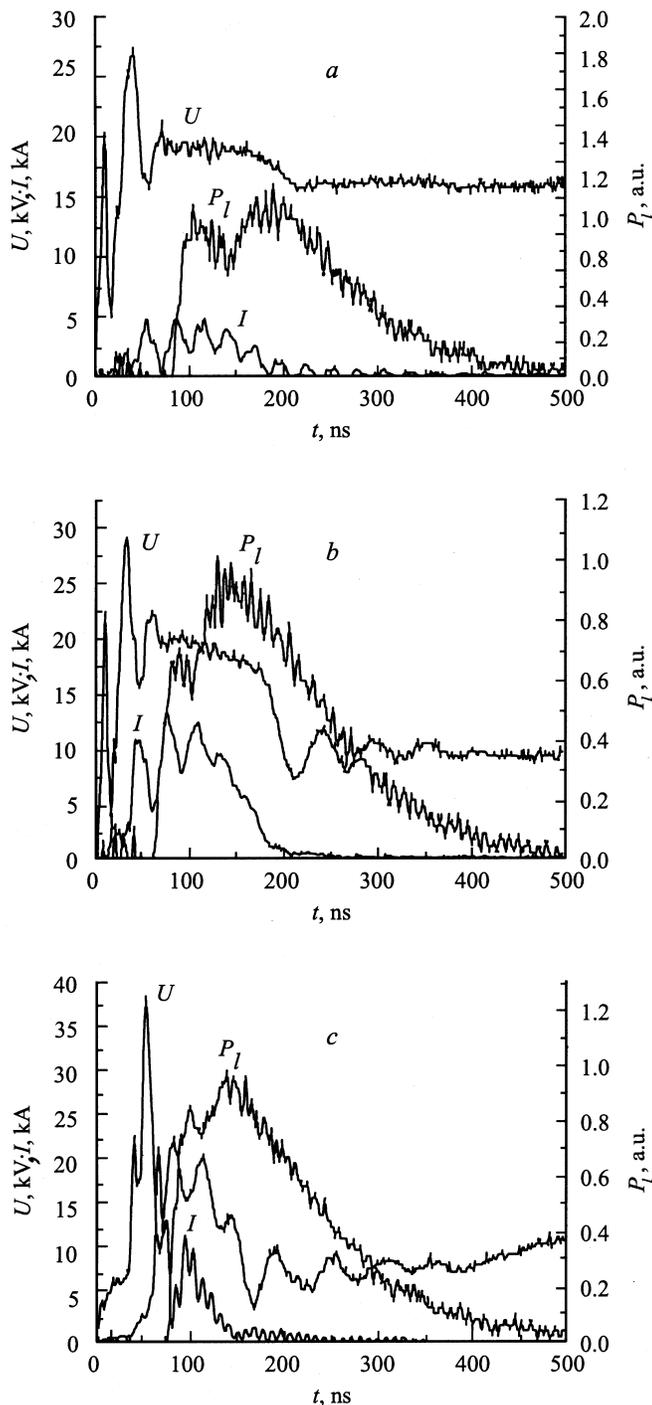


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения, тока и лазерного излучения, полученные при $U_0 = 22$ кВ (*a*) и 30 кВ (*b, c*) и накачке от емкостного (*a, b*) и индуктивного (*c*) накопителей энергии. Смесь $\text{SF}_6 : \text{C}_5\text{H}_{12} = 18 : 1$, $p = 0.05$ атм.

мера на катоде (интегральная картина свечения разряда снималась цифровым фотоаппаратом).

На рис. 1 показаны осциллограммы импульсов напряжения на лазерной камере, тока разряда и генерации HF-лазера в различных режимах. При накачке от емкостного генератора величина остаточного напряжения

увеличивалась с уменьшением зарядного напряжения U_0 и начиная с некоторого напряжения, которое зависело от состава и давления смеси (например, с $U_0 \sim 19$ кВ для смеси $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 36$ Торр : 4.5 Торр), разряд не зажигался. При небольших U_0 подобно [3] наблюдалась квазистационарная фаза разряда с $E/p = 125$ В/см · Торр (рис. 1, *a*). Увеличение зарядового напряжения приводило к уменьшению напряжения на плазме во время протекания тока (рис. 1, *b*). При накачке от генератора с индуктивным накопителем энергии величина остаточного напряжения была сравнительно малой и практически не зависела от зарядного напряжения. Индуктивный накопитель заметно увеличивал пробивное напряжение и формировался короткий импульс тока с амплитудой до 30 кА. При этом основной энерговклад осуществляется на стадии спада напряжения при высокой напряженности электрического поля (рис. 1, *c*).

На рис. 2 приведены зависимости энергии и КПД генерации от вложенной энергии при накачке генераторами с емкостным и индуктивным накопителем энергии. В смеси $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 48$ Торр : 6 Торр, накачиваемой от емкостного накопителя, генерация возникла начиная с зарядного напряжения ~ 26 кВ. При этом полученная максимальная эффективность генерации от вложенной энергии достигала 11%. Увеличение зарядного напряжения приводило к существенному уменьшению эффективности генерации от вложенной энергии, хотя КПД от запасенной энергии возрастал. Как мы отмечали выше, с ростом зарядного напряжения уменьшается остаточное напряжение на промежутке и напряжение на плазме во время разряда. При накачке той же смеси от генератора с индуктивным накопителем энергии генерация возникла при зарядном напряжении ~ 20 кВ, максимальная эффективность генерации от вложенной энергии также достигала $\sim 11\%$, но КПД существенно не изменялся при изменении зарядного напряжения от 22 до 30 кВ.

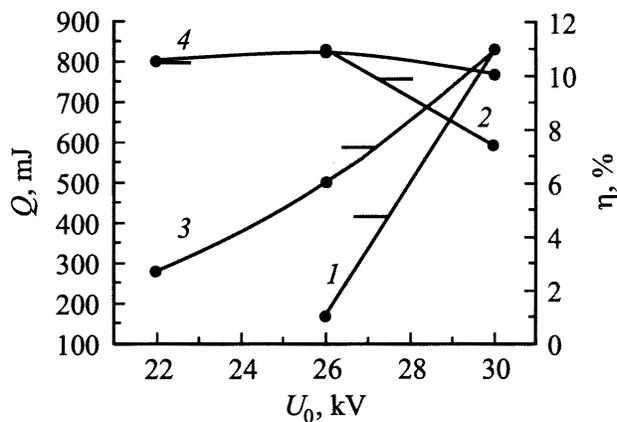


Рис. 2. Зависимости энергии излучения HF лазера (1, 3) и КПД от вложенной энергии (2, 4) от зарядного напряжения. Смесь $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 8 : 1$, $p = 0.072$ атм. Накачка от емкостного (1, 2) и индуктивного (3, 4) накопителей энергии.

В случае емкостного генератора максимальные КПД достигаются при сравнительно малых плотностях тока и минимально возможных зарядных напряжениях. С ростом плотности тока разряда напряжение на промежутке уменьшается, что приводит к уменьшению эффективности генерации от вложенной энергии. В [4] при накачке разрядом, инициируемым рентгеновским излучением, максимальная эффективность от вложенной энергии (8%) также была получена при минимальных энерговкладах, которые для каждой из смесей варьировались за счет амплитуды напряжения, подаваемого на разрядный промежуток. Применение индуктивного накопителя энергии значительно увеличивает энергию, вкладываемую в газ на стадии спада напряжения при высоких значениях E/p на лазерном промежутке. Это позволяет реализовать режим накачки с высоким КПД также и при больших вкладываемых в газ энергиях.

Исследование спектрально-временных характеристик излучения показало, что в режимах максимального КПД спектр генерации НФ лазера существенно расширяется по сравнению с обычным режимом накачки [1]. Так, при высоком КПД генерации в спектре излучения НФ лазера число вращательных линий на каждом колебательном переходе $P(3-2)$, $P(2-1)$ и $P(1-0)$ основного электронного состояния увеличивается до 8–11, а общее число линий генерации достигало 30. Кроме того, в этих условиях реализуются примерно одинаковые мощности излучения на вращательных линиях этих колебательных переходов и последовательная генерация на ряде вращательных линий колебательных переходов. Из анализа амплитудно-временных характеристик генерации на отдельных вращательных линиях следует, что излучение вращательных линий $6 \rightarrow 7$, $7 \rightarrow 8$ и $8 \rightarrow 9$ колебательного перехода $P(3-2)$ дает вклад в излучение вращательных линий $7 \rightarrow 8$, $8 \rightarrow 9$, $9 \rightarrow 10$ колебательного перехода $P(2-1)$ и далее идет вклад этих линий в излучение вращательных линий $8 \rightarrow 9$, $9 \rightarrow 10$, $10 \rightarrow 11$ колебательного перехода $P(1-0)$. При этом наибольшие длительности импульсов генерации регистрируются на вращательных линиях колебательного перехода $P(1-0)$.

4. Таким образом, реализованы два режима накачки с высоким от вложенной энергии КПД ($\sim 10\%$) для НФ лазера. При накачке от генератора с емкостным накопителем энергии максимальные КПД достигаются при минимально возможных для формирования разряда зарядных напряжениях, когда остаточное напряжение после окончания разряда и напряжение на плазме во время накачки максимальны. Однако для данного режима характерны малые удельные энерговклад и энергия излучения. Общий КПД лазера в этом режиме может быть существенно увеличен при использовании генератора на основе линии с распределенными параметрами, который имеет волновое сопротивление, равное сопротивлению разрядной плазмы во время накачки.

При накачке от генератора с индуктивным накопителем энергии высокие КПД реализуются в широком диапазоне зарядных напряжений и энерговкладов, что позволило получить удельную энергию генерации до 4.5 J/l ($100 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$) при КПД $\sim 10\%$.

Данная работа была выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 1206).

Список литературы

- [1] Горюнов Ф.Г., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 12. С. 1148–1150.
- [2] Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 24. С. 60–63.
- [3] Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. // IEEE J. Quant. Electr. 1999. Vol. 35. N 3. P. 261–266.
- [4] Richeboeuf L., Pasquiers S., Doussiet F. et al. // Appl. Phys. B. 1999. Vol. 68. P. 45–53.
- [5] Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.В. и др. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 3. С. 225–228.
- [6] Булаев В.Д., Куликов В.В., Петин В.Н., Югов В.И. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 3. С. 218–220.
- [7] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Панченко А.Н. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 12. С. 1035–1037.
- [8] Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 2. С. 95–100.
- [9] Бакиит Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 6. С. 506–508.