

# Столкновительная генерация на самоограниченном переходе атома гелия

Е.В.Бельская, П.А.Бохан, Д.Э.Закревский, М.А.Лаврухин

*Исследован лазер на самоограниченном переходе атома гелия при возбуждении смеси гелия с молекулярными газами одиночными длинными (до 700 нс), а также сдвоенными наносекундными импульсами. В смесях He – H<sub>2</sub>O и He – NH<sub>3</sub> обнаружено отсутствие ограничений на частоту следования импульсов и получена длительность импульса генерации, равная длительности импульса накачки.*

**Ключевые слова:** столкновительная генерация, гелиевый лазер.

Одним из перспективных направлений развития квантовой электроники является поиск новых и исследование уже существующих газовых лазеров на атомарных средах с девозбуждением нижних рабочих состояний в неупругих соударениях с частицами рабочей смеси. Как правило, подобные столкновительные процессы в таких лазерах эффективны только для достаточно ограниченного круга сред и не носят общего характера (лазеры на переходах  $n^1S_0 - n^1D_2$  группы кислорода [1], лазеры на инертных газах [2, 3], на парах европия и кальция [4] и др.). В настоящей работе предпринята попытка получения столкновительной генерации на переходе с резонансного состояния (РС) на метастабильное состояние (МС) при очистке нижних уровней в процессах, имеющих место при релаксации населенности практически любых уровней. Такими процессами являются электронное девозбуждение и релаксация с передачей энергии молекуле.

В качестве тестовой среды был выбран хорошо изученный He-лазер, который генерирует в самоограниченном режиме на переходе  $2^1P_1^0 - 2^1S_0$  ( $\lambda = 2.06$  мкм) с эффективностью, достигающей 16 % от квантовой [5]. Константа скорости электронного девозбуждения МС гелия  $^1S_0$  в состояние  $^3S_1$  чрезвычайно велика,  $k_c = 4 \times 10^{-7}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> [6], и на порядок превышает константу скорости девозбуждения РС по рабочему переходу [7]. МС гелия также быстро релаксирует при соударениях с разнообразными молекулами с константами  $k_M \approx 10^{-9}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> [6].

Для накачки He-лазера был использован электронный пучок (ЭП), генерируемый открытым разрядом. Такое возбуждение позволяет как реализовывать немаксвелловскую функцию распределения электронов по энергиям, необходимую для генерации по механизму электронного девозбуждения, так и получать генерацию в присутствии молекулярных примесей [5]. Использовалась лазерная кювета длиной 12 см и диаметром 3.1 см с радиальной инжекцией ЭП, описанная в работе [5]. Возбуж-

дение осуществлялось одиночными и сдвоенными наносекундными импульсами от генераторов с обострительной емкостью [5], а также одиночными импульсами длительностью до 700 нс, генерируемыми с помощью искусственной линии с волновым сопротивлением 4 Ом.

При возбуждении одиночными длинными импульсами длительность генерации  $\tau_{max}$  в чистом гелии не превышает 50 нс. Для изучения возможности получения квазинепрерывной генерации проводилось возбуждение активной среды сдвоенными импульсами длительностью 20–30 нс. На рис.1 кривой 1 показана типичная зависимость отношения энергий генерации во втором импульсе  $w_2$  к ее энергии в первом импульсе  $w_1$  от временной задержки  $\Delta t$  между ними в чистом гелии. Видно, что генерация второго импульса возникает при  $\Delta t \gtrsim \Delta t_{min} \approx 1.25$  мкс, что сопоставимо с данными для Rb-лазера с ЭП накачкой на  $\lambda = 723$  нм [8], нижний уровень которого также эффективно девозбуждается электронами.

Введение молекулярных примесей существенно изменяет поведение генерации во втором импульсе. Исследовались смеси гелия с H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O. Уже небольшие добавки этих газов приводят к уменьшению  $\Delta t_{min}$ . Однако при увеличении давления примесей генерация во втором импульсе ведет себя для различных газов по-разному. В смесях с димерами вплоть до предельного давления примеси, при котором генерация еще имеет

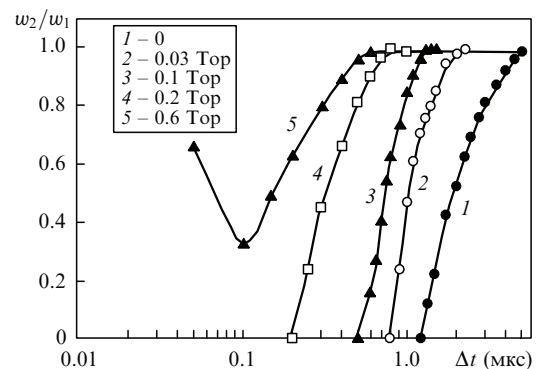


Рис.1. Зависимости отношения энергий генерации во втором ( $w_2$ ) и первом ( $w_1$ ) импульсах от задержки между ними  $\Delta t$  при  $p_{He} = 7$  Тор и  $p_{H_2O} = 0 - 0.6$  Тор.

Е.В.Бельская, П.А.Бохан, Д.Э.Закревский, М.А.Лаврухин. Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В.Ржанова, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13; e-mail: belskaya@ngs.ru, bokhan@isp.nsc.ru, zakrdrm@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 7 июня 2010 г.

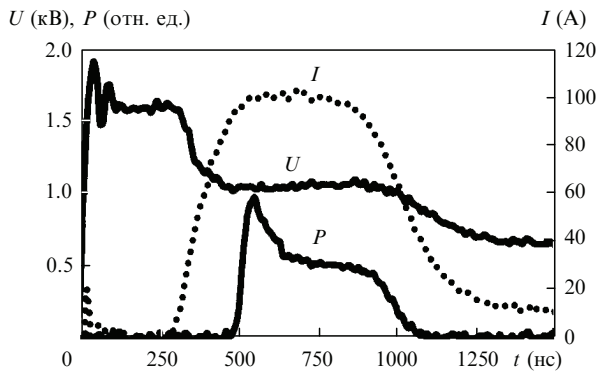


Рис.2. Оциллограммы напряжения  $U$ , тока разряда  $I$  и интенсивности излучения  $P$  в смеси  $\text{He}-\text{H}_2\text{O}$  при  $p_{\text{He}} = 6$  Тор,  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 1.1$  Тор.

место,  $\Delta t_{\text{min}}$  составляет  $\sim 650$  нс (в случае  $\text{He}-\text{H}_2$ ), несколько меньше  $\Delta t_{\text{min}}$  для  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ . Наименьшее значение  $\Delta t_{\text{min}}$  реализуется в смесях с  $\text{NH}_3$  (60 нс) и  $\text{H}_2\text{O}$ . На рис.1 представлены зависимости относительной энергии генерации во втором импульсе  $w_2/w_1$  от задержки  $\Delta t$  между импульсами накачки при различных давлениях паров воды. С ростом  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  величина  $\Delta t_{\text{min}}$  уменьшается (увеличение  $w_2/w_1$  при  $\Delta t = 60$  нс и  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0.6$  Тор на рис.1 – результат частичного перекрытия первого и второго импульсов при малых  $\Delta t$ ).

При возбуждении одиночными длинными импульсами в смесях гелия с  $\text{NH}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$  получено удлинение импульса генерации по сравнению со случаем чистого гелия. В случае смеси  $\text{He}-\text{H}_2\text{O}$  импульс генерации практически симметричен относительно прямоугольного импульса возбуждения и достигает длительности  $\sim 600$  нс (рис.2). Мощность генерации при этом не уступает мощности генерации в самоограниченном режиме без примеси  $\text{H}_2\text{O}$ .

Максимальная длительность импульса генерации и концентрация электронов в самоограниченном режиме могут быть получены из решения системы кинетических уравнений [5], описывающих заселение РС и МС и учитывающих каскадные переходы. При линейном во времени нарастании мощности накачки максимальная расчетная

длительность генерации  $\tau_{\text{max}} \leq 50$  нс, а при накачке прямоугольным импульсом  $\tau_{\text{max}} \leq 24$  нс, что совпадает с результатами эксперимента. В смесях с  $\text{NH}_3$  и с  $\text{H}_2\text{O}$  длительность импульсов генерации более чем на порядок больше, чем в чистом гелии, что свидетельствует о переходе генерации в столкновительный квазинепрерывный режим. К моменту ее развития концентрация электронов  $n_e$  достигает  $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует скорости девозбуждения МС  $k_e n_e = 1.2 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$ . Если принять, что константа скорости девозбуждения МС гелия  $^1\text{S}_0$  молекулами примеси  $k_M = 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , то при их концентрации  $n \sim 10^{16} \text{ см}^3$  скорость релаксации  $k_M n \approx 10^7 \text{ с}^{-1}$ . Следовательно, как электроны, так и молекулярные примеси эффективно девозбуждают МС. Получение квазинепрерывной генерации только в смесях гелия с  $\text{NH}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$  можно объяснить тем, что колебательные состояния этих полярных молекул релаксируют очень быстро, благодаря чему плазменные электроны имеют эффективный канал охлаждения, что и приводит к тушению МС гелия  $^1\text{S}_0$  и к получению квазинепрерывной лазерной генерации.

Таким образом, в проведенных экспериментах осуществлен перевод самоограниченной генерации в гелии в квазинепрерывный режим с использованием двух механизмов очистки нижнего рабочего состояния – электронного девозбуждения и тушения метастабильных состояний гелия в столкновениях с молекулами.

1. Powell H.T., Murray J.R., Rhodes C.K. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 730 (1974).
2. Basov N.G., Baranov V.V., Chungunov A.Y., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**, 1756 (1985).
3. Ohawa M., Mozart T.J., Kushner M.J. *J. Appl. Phys.*, **66**, 5131 (1989).
4. Бохан П.А. *Письма в ЖТФ*, **12**, 161 (1986).
5. Бельская Е.В., Бохан П.А., Закревский Д.Э. *Квантовая электроника*, **38**, 823 (2008).
6. *Справочник констант элементарных процессов с участием атомов, ионов, электронов, фотонов*. Под ред. А.Г.Жиглинского (С.-Пб: Изд-во С.-ПбУ, 1994).
7. Fon W.C., Berrington K.A., Burke P.G., Kingston A.E. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, **14**, 2921 (1981).
8. Бохан П.А. *Квантовая электроника*, **12**, 945 (1985).