

МОЩНАЯ КВАЗИНЕРЫВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА СМЕСИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

*Н.Г.Басов, А.Ю.Александров, В.А.Данилычев, В.А.Долгих,
О.М.Керимов, Ю.Ф.Мызников, И.Г.Рудой, А.М.Сорока*

Впервые получена мощная квазинепрерывная генерация с КПД $\approx 1\%$ на $3p - 3s$ переходах неона при возбуждении электронным пучком смеси Не : Не : Kr (Ar) высокого давления. Селективное заселение верхних лазерных уровней осуществляется в результате диссоциативной рекомбинации электрона с молекулярным ионом неона, а эффективное расселение нижних лазерных уровней – в процессе с освобождением электрона при взаимодействии резонансных уровней атомов неона с криптоном (аргоном).

Впервые генерация на самоограниченных $np^5(n+1)p - np^5(n+1)s$ переходах сжатых тяжелых инертных газов (Ar, Kr, Xe) была получена группой В.П.Чеботаева в быстром разряде (мощность накачки $\gtrsim 1$ ГВт/л) при возбуждении верхнего лазерного уровня электронным ударом из основного состояния¹. Другим эффективным механизмом селективного заселения низколежащих p -состояний, реализующимся при накачке электронным пучком инертных газов высокого давления, является диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов².

Большие ($\gtrsim 10^{-13}$ см²)³ сечения разрешенных $p - s$ переходов принципиально позволяют реализовать квазинепрерывный режим генерации в видимой области спектра в случае селективного расселения $np^5(n+1)s$ состояний. Однако, быстрый спонтанный распад верхнего лазерного уровня $v_{sp} \sim 10^8$ с⁻¹ требует высокой $\sim 10^9$ с⁻¹ скорости расселения нижнего уровня. Такая частота дезактивации должна обеспечиваться величиной константы скорости "тушащего" процесса $\sim 10^{-9}$ см³ · с⁻¹, которая может быть достигнута, например, в процессе с ионизацией тушителя. С этой точки зрения представляется перспективным использование $3p - 3s$ переходов Не, так как его $3s$ -состояния лежат выше потенциала ионизации большинства атомов и молекул, и длины волн излучения всех этих переходов лежат в видимом диапазоне. В качестве "тушителя" $3s$ -состояний предпочтительны тяжелые инертные газы. В этом случае константа скорости процесса перезарядки с Ne_2^+ , конкурирующего с диссоциативной рекомбинацией Ne_2^+ , относительно мала⁴.

В столкновении с освобождением электрона наиболее быстро тушатся состояния, резонансно связанные с основным, что обеспечивает их селективное расселение. Например, скорость расселения резонансного $2^1P_1^0$ состояния Не в процессе с ионизацией тяжелых инертных газов на $1 \frac{1}{2}$ порядка превосходит скорость дезактивации метастабильных состояний 2^1S_0 и 2^3S_1 ⁵. В случае Не соответствующие экспериментальные данные отсутствуют. Однако, оценка согласно⁵ показывает, что необходимая скорость расселения резонансного $3s'[1/2]_0^0$ состояния может быть достигнута уже при концентрации тушителя $\sim 10^{18}$ см⁻³ (для другого резонансного уровня $3s[3/2]_1^0$ константа скорости дезактивации в 2,5 раза меньше). Концентрация Не ограничивается собственным тушением верхних лазерных уровней и, например, для уровня $3p'[1/2]_0$ составляет $\sim v_{sp}/K_t \approx 100$ торр, $K_t \approx 2 \cdot 10^{-11}$ см³ · с⁻¹ – константа скорости тушения этого уровня неоном. Эффективность возбуждения и генерации увеличивается при использовании буферного газа, которым для Не может быть только Не. Мощность накачки, определяющая плотность "медленных" электронов, ограничивается как "гашением" верхнего лазерного уровня электронами³, так и трехчастичной рекомбинацией He_2^+ с участием двух электронов⁶. Отметим, что диссоциативная рекомбинация молекулярного иона гелия происходит медленно, а скорость перезарядки с He_2^+ на Не значительно больше, чем на Ar, Kr, Xe⁴.

Приведенные соображения позволяют рассчитывать на получение квазинепрерывной генерации на $3p - 3s$ -переходах Ne при возбуждении трехкомпонентной смеси благородных газов высокого давления электронным пучком.

В настоящей работе возбуждение смеси He/Ne/Kr (Ar) осуществлялось электронным пучком с параметрами: плотность тока $10^{-3} \div 10 \text{ A/cm}^2$, длительность импульса $0,5 \div 200 \text{ мкс}$, средняя энергия электронов $\approx 200 \text{ кэВ}$. Спектры лазерного излучения регистрировались с помощью спектрографа ИСП-51. Энергия генерации измерялась калориметром с чувствительностью 20 мВ/Дж . Оптический объем лазера составлял 1 л.

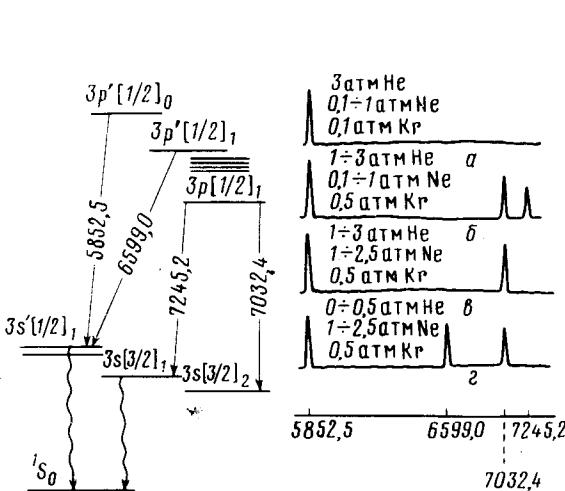


Рис. 1

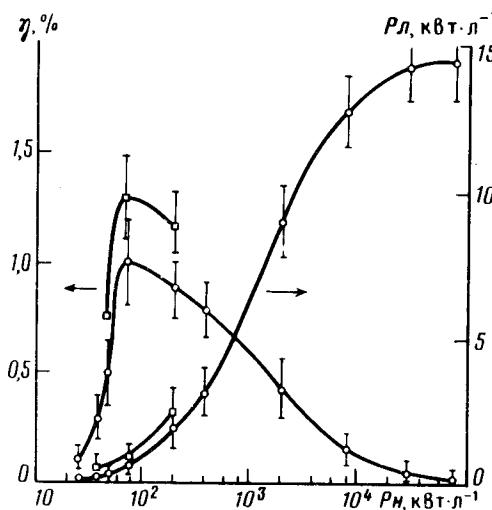


Рис. 2

Рис. 1. Схема уровней неона и спектры генерации

Рис. 2. Зависимость мощности генерации и КПД лазера от мощности накачки: ○ – смесь He/Ne/Kr, □ – смесь He/Ne/Ar

На рис. 1 приведена схема $3p$, $3s$ уровней Ne и показаны наблюдавшиеся лазерные переходы. Здесь же приведены денситограммы спектров генерации и смеси, при возбуждении которых получены соответствующие линии. При относительно небольших концентрациях Ne и Kr (Ar) в смеси генерация происходит только на $\lambda = 5852,5 \text{ \AA}$ (рис. 1, a). Это обусловлено высокой эффективностью заселения состояния $3p'[1/2]_0$ при диссоциативной рекомбинации Ne_2^+ ²⁾, наиболее быстрым в рассматриваемой системе переходов рассеянием нижнего резонансного $3s'[1/2]_1$ уровня, а также оптимальным для генерации соотношением статистических весов этих уровней. Перемешивание состояний $3s[3/2]_1$ и $3s[3/2]_2$ неонон (за счет обменного взаимодействия) и электронами, а также быстраяdezактивация резонансного уровня $3s[3/2]_1$ криптоном приводят при увеличении давления Ne, Kr к появлению генерации на $\lambda = 7032,4 \text{ \AA}$ и $\lambda = 7245,2 \text{ \AA}$ (рис. 1, б, в).¹⁾ Поскольку верхний лазерный уровень у этих переходов совпадает, то появление в спектре генерации обеих линий (рис. 1, б) означает, что при давлении $\text{Ne} \lesssim 1 \text{ атм}$ переход $3p[1/2]_1 - 3s[3/2]_2$ является самоограниченным. Дальнейшее увеличение давления Ne в смеси (рис. 1, в) позволяет получить квазинепрерывное (длительность накачки и генерации $\approx 0,5 \text{ мкс}$) лазерное излучение на $\lambda = 7032,4 \text{ \AA}$. Уменьшение давления Ne в смеси замедляет обмен между группами уровней $3p' - 3p$ и сопровождается появлением генерации на $\lambda = 6599,0 \text{ \AA}$ (рис. 1, г).

¹⁾ Генерация на этих длинах волн также получена в ⁷.

Максимальные КПД η и энергия генерации в настоящей работе получены для перехода $3p'[1/2]_0 - 3s'[1/2]_1$. На рис. 2 приведены зависимости КПД и удельной мощности генерации $P_{\text{л}}$ на $\lambda = 5852,5 \text{ \AA}$ от удельной мощности накачки $P_{\text{н}}$. Для фиксированного значения плотности тока пучка оптимизировался состав смеси при неизменном суммарном давлении 3 атм, а также параметры резонатора, поскольку интенсивность излучения в резонаторе ограничивается конечной скоростью расселения нижнего лазерного уровня. Отметим, что при давлении Kr (Ar) ≥ 30 торр для всех исследуемых режимов возбуждения импульс генерации повторял импульс накачки, и максимальная длительность генерации достигала 200 мкс. Экспериментальные точки на рис. 2 соответствуют максимальным значениям η , $P_{\text{л}}$. Оптимальный КПД $\approx 1\%$ достигается при $P_{\text{н}} \approx 70 \text{ кВт/л}$, что соответствует плотности тока электронного пучка $\sim 10 \div 20 \text{ mA/cm}^2$ при характерном составе смеси He/Ne/Kr (Ar) = 50/1,5/1. Уменьшение η при увеличении мощности накачки связано прежде всего, как уже отмечалось выше, с усилением влияния процессов электронной дезактивации уровня $3p'[1/2]_0$ и трехчастичной рекомбинации He_2^+ . Оценка показывает, что при удельной мощности накачки $\sim 2 \text{ МВт/л}$ скорости этих процессов сравнимы со скоростями спонтанного распада верхнего лазерного уровня и перезарядки с He_2^+ на Ne, соответственно. Отметим, что в широком диапазоне изменения $P_{\text{н}} \approx 60 \div 400 \text{ кВт/л}$ КПД изменяется не более чем на 20 %. Поскольку скорость перезарядки с He_2^+ на Kr (конкурирующей с рекомбинационным заселением верхнего лазерного уровня) примерно на порядок выше чем на Ar, то замена криптона аргоном приводит к некоторому улучшению удельных лазерных характеристик при малых мощностях накачки.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально показана возможность быстрого ($\leq 1 \text{ нс}$) селективного расселения резонансных $3s$ состояний Ne в процессе с освобождением электрона, и впервые получена мощная квазинепрерывная генерация в видимом диапазоне длин волн при возбуждении смеси сжатых благородных газов. Лазерное излучение наблюдалось на четырех линиях системы $3p - 3s$ переходов неона. Максимальный КПД $\approx 1\%$ получен на $\lambda = 5852,5 \text{ \AA}$.

Авторы выражают благодарность В.Ю.Ананьеву, А.А.Ионину, А.П.Лыткину, А.Ю.Самарину, Г.Ю.Таманяну за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. Chapovsky P.L., Lisitsyn V.N., Sorokin A.R. Opt. Comm., 1976, 16, 33.
2. Frommhold L., Biondi M.A. Phys. Rev., 1969, 5, 244.
3. Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука, 1979.
4. Вирин Л.И., Джагацянян Р.В., Карабеев Г.В. и др. Ионно-молекулярные реакции в газах. М.: Наука, 1979.
5. Смирнов Б.М. Возбужденные атомы. М.: Энергоиздат, 1982.
6. Deloche R., Confalon A., Chevet M. Compt. rend. Acad. Sci., 1968, 267, 934.
7. Баранов В.В., Басов Н.Г., Данилычев В.А. и др. Квантовая электроника, 1985, 12, 1183.