

02;04;07;12

Применение поперечного наносекундного разряда в режиме допробойного ионизационного размножения электронов для селективного возбуждения атомов неона

© А.К. Шуаибов

Ужгородский государственный университет

Поступило в Редакцию 3 июня 1997 г.

Проведено исследование характеристик поперечного наносекундного разряда в смесях Ne/SF₆ и He/Ne/SF₆, получаемого в режиме допробойного ионизационного размножения электронов. Изучены условия получения устойчивого поперечного разряда с искровой УФ предыонизацией, спектральные и временные характеристики излучения плазмы. Показана перспективность применения данного режима зажигания поперечного разряда для селективного возбуждения атомов неона, что может быть использовано при разработке электроразрядного плазменного лазера на $\lambda = 585.3 \text{ nm Ne}(3s - 3p)$.

Применение традиционного сильноточного поперечного разряда, получаемого в смесях типа He/Ne/H₂ при средних давлениях ($P = 10-20 \text{ kPa}$), для накачки плазменных лазеров на $\lambda = 585.3 \text{ nm NeI}$ показало, что его эффективность является низкой [1,2]. Это обусловлено отсутствием в плазме поперечного разряда высокоэнергетических электронов и рассогласованием импедансов источника накачки и поперечного разряда. Добавки электроотрицательных молекул (NF₃, $P = 3-4 \text{ kPa}$) к атомам He и Ne позволили увеличить энергию генерации лазера с накачкой поперечным разрядом на порядок, но длительность импульсов излучения не превышала при этом 10–20 ns, а основным механизмом заселения верхнего лазерного состояния был прямой электронный удар [3,4]. Применение разрядов с жесткой составляющей тока [5], продольного разряда и разряда с полым катодом [6] позволило увеличить длительность генерации за счет включения рекомбинационных механизмов заселения $3p$ состояний NeI, но возможности пространственного

масштабирования объема активной среды лазера при данных способах накачки ограничены.

В настоящей работе исследованы характеристики поперечного разряда с искровой УФ предьонизацией, зажигаемого в режиме допробойного ионизационного размножения электронов с целью создания столкновительно-неравновесной плазмы на смесях Ne/SF₆ и He/Ne/SF₆. Для расселения нижнего лазерного состояния неона предложено использовать молекулы SF₆, ранее применявшиеся для получения генерации на 3s–3p переходах NeI в красной области спектра [7]. В работе [8] показано, что в объемном разряде на смеси He/Kr/F₂ реализуется устойчивая стадия с допробойным ионизационным размножением, перспективная для получения генерации на 249 nm KrF*. Возможности реализации такого типа поперечного разряда в рабочей среде плазменного лазера на атомах неона не исследовались. Разряд на стадии допробойного ионизационного размножения развивается в условиях значительной напряженности электрического поля на электродах в течение всего времени энергообклада и характеризуется плотностью электронов в плазме 10¹²–10¹³ см⁻³. Это делает его близким к электроионизационному разряду, а по плотности электронов достаточным для получения инверсии на λ = 585.3 nm NeI.

Поперечный разряд с допробойным ионизационным размножением исследовался в излучателе лазерного диагностического комплекса, описанного в [9]. Разряд зажигался в системе электродов длиной 18 см и радиусом закругления рабочей поверхности 1.7 см. Ширина разрядной области — 0.7 см. Предьонизация осуществлялась при помощи двух искровых линеек, установленных по обе стороны от катода. Генератор импульсных напряжений изготовлен по LC-схеме с основной накопительной емкостью — 30 nF и обострительной — 9.4 nF. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ1 1000/25. Импульсы тока и напряжения поперечного разряда измерялись при помощи пояса Роговского и малоиндуктивного емкостного делителя напряжения. Спектры излучения плазмы исследовались с применением монохроматора МДР-2, ФЭУ "Фотон", электрической системы регистрации редкоповторяющихся импульсов излучения и самописца КСП-4. Временные характеристики излучения поперечного разряда регистрировались электронным линейным умножителем ЭЛУ14-ФС и осциллографами БЛОП-04 или С1-79. При давлении смесей Ne/SF₆ и He/Ne/SF₆ в пределах 5–200 kPa до зажигания сильноточного диф-

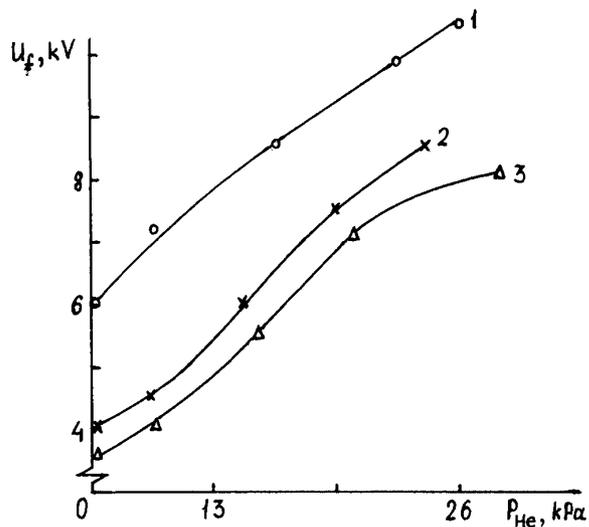


Рис. 1. Зависимость напряжения зажигания поперечного разряда в стадии допробойного ионизационного размножения от давления и состава газовых смесей: 1 — $Ne/SF_6 = 32/1.6$ кПа; 2 — $20/0.8$ кПа; 3 — $10/0.8$ кПа.

фузного поперечного разряда в узком диапазоне напряжения питания $\Delta U = \pm 0.5$ кВ получен устойчивый, пространственно-однородный разряд желтого цвета с апертурой 0.7×2.2 см. Коэффициент заполнения плазмой межэлектродного промежутка равнялся единице, что значительно превышало его значение ($k = 0.5-0.7$) в режиме сильноточного поперечного разряда в рабочих средах $HeCl^*$ лазера. Величина k близка к значению коэффициентов заполнения для поперечного разряда с анизотропно-резистивными электродами [10], что делает перспективным применение поперечного разряда с допробойным ионизационным размножением в широкоапертурных излучателях. Изучение обзорных спектров излучения поперечного разряда с допробойным ионизационным размножением в смесях $(He)/Ne/SF_6$ показало, что в желто-красной области спектра основной линией излучения является $\lambda = 585.3$ nm NeI с контрастом относительно других линий на $3s-3p$ переходах NeI в пределах 7–12.

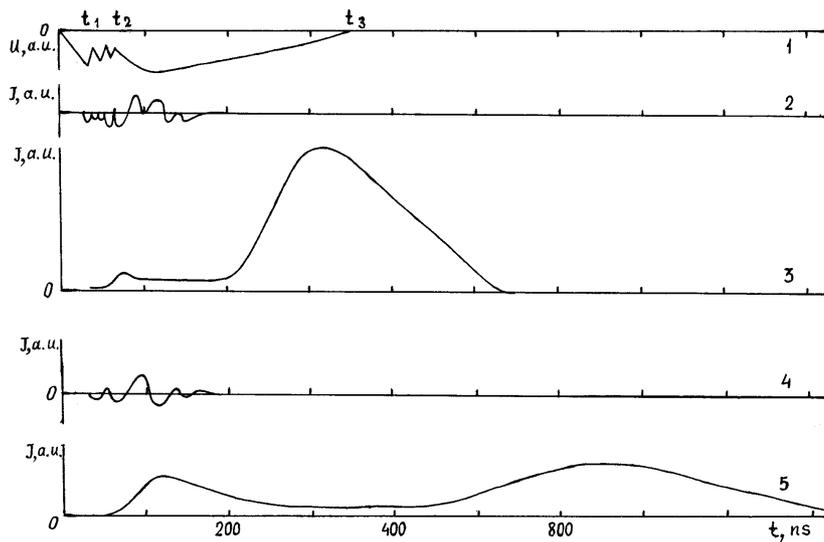


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока, напряжения и излучения на $\lambda = 585.3 \text{ nm}$ NeI поперечного разряда в режиме допробойного ионизационного размножения, зажигаемого в смесях $\text{Ne}/\text{SF}_6 = 60/0.8 \text{ kPa}$ (1–3) и $166/0.4 \text{ kPa}$ (4, 5).

На рис. 1 приведены зависимости предельного напряжения зажигания поперечного разряда в режиме допробойного ионизационного размножения (U_f) от давления и состава смеси (He)/Ne/SF₆. Оптимальное содержание молекул SF₆ находилось в диапазоне 0.5–1.0 kPa. С повышением содержания SF₆ и давления неона в двойной смеси величина U_f и энергетика поперечного разряда увеличивались. При значительном увеличении содержания молекул SF₆ ($\geq 1.6 \text{ kPa}$) наблюдалось ухудшение однородности УФ предьонизации и разряд с допробойным ионизационным размножением становился неустойчивым. Добавки He к смеси Ne/SF₆ приводили к росту величины U_f , но для интенсивности излучения с $\lambda = 585.3 \text{ nm}$ NeI существовали оптимальные значения плотности атомов He в тройной смеси. Временные характеристики поперечного разряда с допробойным ионизационным размножением на смесях Ne/SF₆ приведены на рис. 2. После пробоя разрядного про-

межутка на электродах сохраняется высокое значение напряженности электрического поля. Импульс напряжения состоял из участка резкого спада $U - (0; t_1)$, соответствующего пробую разрядного промежутка; участка $(t_1; t_2)$ — квазистационарной стадии горения, на которой устанавливается ионизационно-прилипательное равновесие, и промежутка времени $(t_2; t_3)$ — стадии допробойного ионизационного размножения. Форма U до момента времени t_2 была подобной для импульсного разряда на чистом SF_6 в системе металлических электродов с УФ предьонизацией [11]. Импульс излучения на $\lambda = 585.3 \text{ nm}$ NeI состоял из начального стационарного участка малой амплитуды и интенсивного второго максимума, образующегося при полном спаде напряжения на разрядном промежутке (момент времени t_3). Общая длительность излучения по основанию осциллограммы достигала $1.0 \mu\text{s}$. Увеличение давления неона ($\geq 50\text{--}70 \text{ kPa}$) приводило к спаду интенсивности излучения на данной линии неона и изменению соотношения между первым и вторым максимумами излучения NeI и росту его длительности ($\geq 1.0 \mu\text{s}$). Как видно из рис. 2, в данной плазме реализуется рекомбинационный режим заселения $3p$ состояния NeI. На стадии допробойного ионизационного размножения в сильном электрическом поле происходит наработка возбужденных атомов неона, их ступенчатая ионизация, конверсия Ne^+ в ионы Ne_2^+ , HeNe^+ , которые при уменьшении параметра (E/N) , вследствие рекомбинационных процессов, приводят к селективному заселению $\text{Ne}(3p)$. Конкретный механизм заселения верхнего состояния для перехода с $\lambda = 585.3 \text{ nm}$ NeI в пробойном разряде с допробойным ионизационным размножением требует специального исследования.

Таким образом, показано, что в пробойном разряде с допробойным ионизационным размножением на смесях $\text{He}(\text{Ne})/\text{SF}_6$ при атмосферных давлениях зажигается устойчивый разряд с коэффициентом заполнения межэлектродного промежутка, равным единице, высокой пространственной однородностью и неравновесным заселением $3p$, $3s$ состояний атома неона, что представляет интерес для разработки электроразрядных плазменных лазеров на $\lambda = 585.3 \text{ nm}$ NeI.

Список литературы

- [1] Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 5. С. 992–995.
- [2] Батырбеков Г.А., Батырбеков Э.Г., Данилычев В.А., Назаров А.М. и др. // Квант. электрон. 1989. Т. 16. № 10. С. 2060–2062.

- [3] *Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 11. С. 1045–1048.
- [4] *Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф.* // Квант. электрон. 1992. Т. 19. № 2. С. 146–150.
- [5] *Латуш Е.Л., Сэм М.Ф., Чеботарев Г.Д.* // Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 11. С. 1418–1423.
- [6] *Борисов В.Б., Егоров В.С., Кишин М.Н., Пастор А.А.* и др. // Опт. и спектр. 1992. Т. 72. В. 5. С. 1064–1068.
- [7] *Каслин В.М., Петраш Г.Г.* // ЖПС. 1970. Т. 12. В. 3. С. 540–542.
- [8] *Борисов В.М., Высикайло Ф.И., Христофоров О.Б.* // Квант. электрон. 1985. Т. 12. № 6. С. 1311–1313.
- [9] *Шуаибов А.К., Неймет Ю.Ю., Ходанич А.И., Шевера В.С.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. С. 713–716.
- [10] *Канатенко М.А.* // ЖТФ. Т. 64. В. 6. С. 198–201.
- [11] *Спичкин Г.Л.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 10. С. 1923–1932.