Math-Net.Ru
All Russian mathematical portal

I. I. Galaktionov, V. Yu. Gorelov, I. V. Podmoshenskiĭ, *Kvantovaya Elektronika*, 1976, Volume 3, Number 12, 2570–2575

https://www.mathnet.ru/eng/qe12541

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
https://www.mathnet.ru/eng/agreement

Download details:
IP: 18.97.14.83
December 5, 2025, 23:56:06

«*Квантовая электроника*», 3, № 12 (1976) УДК 539.196

И. И. Галактионов, В. Ю. Горелов, И. В. Подмошенский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОИОНИЗАЦИОННОГО CO_2-ЛАЗЕРА

Приведены электрические и генерационные характеристики фотоионизационного CO_2-лазера, полученные в условиях разделения генерационной кюветы от источников света кварцевой трубой. Показано наличие ионизационного усиления на парах N,N-диметиланилина, добавляемого в генерационную смесь. Определены потери на поглощение в парах присадки, составляющие 7% на один проход. Получен КПД 10% при вкладе в объемный разряд 180 Дж/(л·атм) в активном объеме 0,32 л.

Введение

Лазеры атмосферного давления на CO_2 с несамостоятельным поперечным разрядом в принципе обладают высоким удельным энергосъемом. В качестве источника ионизирующего излучения в таких лазерах используется излучение ядерного реактора [1], пучки высокоэнергетичных электронов [2], УФ излучение [3—6]. Фотоионизационные лазеры при этом выгодно отличаются простотой устройства и отсутствием опасной радиации.

Для проведения данной работы был создан фотоионизационный лазер, в котором для улучшения условий эксперимента камера источников света герметично отделена от центральной лазерной кюветы кварцевой трубкой. В качестве фотоионизируемой присадки в смесь газов CO_2 — N_2 — He добавлялся N,N-диметиланилин с потенциалом ионизации 7,14 эВ. Излагаемые далее экспериментальные результаты являются продолжением полученных в предшествующей работе [5]. Исследовалось поведение тока объемного разряда и генерации в зависимости от электрического поля для смесей состава $CO_2:N_2:He=1:2:3$ и $1:4:5$.

Описание установки

Схема лазера представлена на рис. 1. Корпус камеры источников света представляет собой герметичный капролоновый ящик с внутренними размерами 50,0×27,0×19,0 см. Съемная верхняя крышка обеспечивает доступ к электродам источника света. На торцах корпуса закреплены юстировочные узлы резонатора и фланцы с окнами из BaF_2 для вывода излучения.

Камера источников света после вакуумирования наполнялась аргоном до давления в одну атмосферу в соответствии с рекомендацией работы [7].

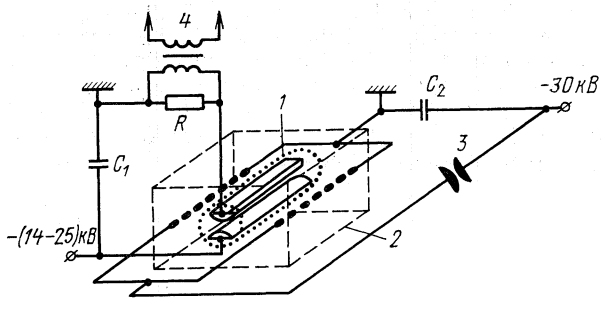

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — кварцевая трубка; *2* — капролоновый ящик; *3* — разрядник; *4* — к осциллографу.

Авторы не ставили своей целью исследование и разработку нового источника УФ излучения. Из существующих в настоящее время наиболее экономичным, по-видимому, является источник со скользящим разрядом [6]. С двух сторон от лазерной кюветы, выполненной в виде кварцевой трубы из КУ-2 (ГОСТ 15130—69) с внутренним диаметром 60 мм и толщиной стенки 5 мм, расположены две цепочки электродов с одиннадцатью промежутками в каждой цепочке, служащих источниками УФ излучения при разряде емкости C_2=3 мкФ, заряженной до 30 кВ. Пропускание используемого кварца на длине волны λ=170 нм составляло 20%. Две емкости по 1 нФ между землей и центральным электродом были предназначены для облегчения пробоя промежутков, общая длина которых составляла 11 см. Период тока разряда источников света составлял 13 мкс, амплитуда в максимуме первого полупериода в цепочке — 20 кА.

Откачка лазерной кюветы и камеры источника света осуществлялась форвакуумным насосом до остаточного давления $5\cdot10^{-2}$ мм рт. ст. Натекание откачанных объемов из атмосферы не превышало 0,1 мм рт. ст./мин. Генерационная смесь газов (углекислота, азот и гелий высокой чистоты) приготовлялась в специальном металлическом смесителе с объемом $\sim$10 л в требуемых пропорциях при давлении в несколько атмосфер. Поступающий из смесителя газ барбатировался через жидкий N,N-диметиланилин (ДМА), насыщался его парами и далее заполнял до необходимого давления предварительно откачанную лазерную кювету. После каждого эксперимента генерационная смесь менялась, поскольку при повторном ее использовании было замечено снижение уровня генерации. Дополнительными опытами было также выяснено, что эффект снижения обусловлен как фотолизом, так и действием электрического разряда на ДМА. В источниках света смена аргона производилась после 15—20 импульсов, так как ощутимого изменения интенсивности источников при повторных опытах не наблюдалось. Объемный разряд осуществлялся в промежутке между введенными в кварцевую трубу дюралюминиевыми электродами.

Резонатор состоял из глухого сферического зеркала диаметром d=6 см с фокусным расстоянием f=10 м (золото на стали Х18Н9Т) и выходного плоского зеркала. Расстояние между зеркалами составляло 70 см. В качестве выходного зеркала использовалось металлическое зеркало (с отверстием в центре диаметром 0,5 см) или плоскопараллельная германиевая пластинка с коэффициентом отражения 0,55. Регистрация тока объемного разряда в лазерной кювете осуществлялась с помощью безындукционного шунта R=0,142 Ом, сигнал с которого через разделительный ферритовый трансформатор поступал на осциллограф С1-42. Энергия генерации определялась либо по показаниям прибора Ф-116/2 в сочетании с измерительной головкой ТПИ-2А, либо по калиброванной термочувствительной бумаге [8]. Для получения временного хода генерации использовался приемник «Свод».

Вольт-амперные характеристики разряда

Во всех экспериментах снимались токовые характеристики объемного разряда. Схема измерений показана на рис. 1. Разряд емкости C_1 характеризовался двумя стадиями, показанными на осциллограмме (рис. 2, *а*, *б*): стадией объемного разряда и стадией искрового пробоя, наступающей через некоторое время после начала объемной стадии. При увеличении напряжения на конденсаторе C_1 задержка между началами объемной и пробойной стадий уменьшалась, сокращая длительность существования объемной стадии τ.

Из полученных осциллограмм определялась зависимость максимальной амплитуды тока от E/p. Необходимо заметить, что во время существования объемной стадии разряда конденсатор частично разряжался, что приводило к снижению E/p в газе. Ниже приведено вычисленное относительное понижение E/p для момента времени, соответствующего максимуму тока.

E/p, В/(см·мм рт. ст.)	$\Delta u/u$
8,1	0,007
9,15	0,019
10,3	0,044
11,0	0,060

Результаты обработки осциллограмм с систематической погрешностью согласно приведенным данным показаны на рис. 3, *а*. Давление во всех экс-

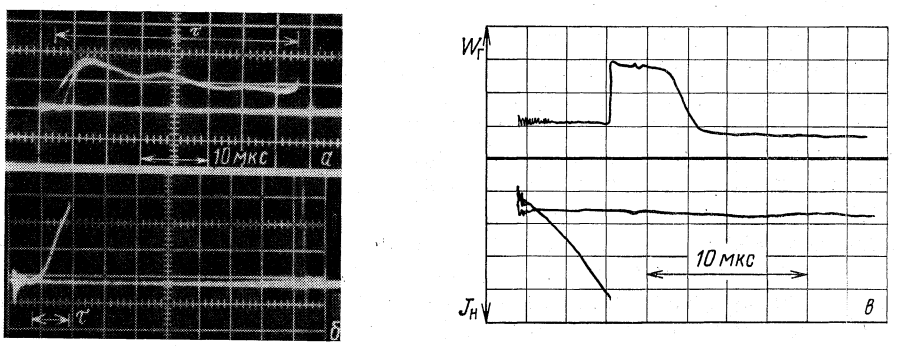

Рис. 2. Осциллограммы фотоионизационного тока :E/p=9,1 (*а*), 11,7 В/(см·мм рт. ст.) (*б*) и импульсов тока накачки и генерации (*в*).

периментах составляло 1 атм. Для исключения влияния уменьшения E/p на ход кривой тока были проведены контрольные опыты, в которых максимальное снижение E/p достигало 2,5% при 11 В/(см·мм рт. ст.). Как показало сравнение, контрольные данные позволяют пренебречь имеющимся снижением напряжения на емкости и считать, что данные получены в условиях постоянства E/p во время разряда. Используя расчетные значения по дрейфовой скорости электронов [9] для смесей состава 1 : 1 : 8 и 1 : 2 : 3, из которых видно, что в области 1—12 В/(см·мм рт. ст.) дрейфовая скорость от состава смеси зависит слабо, можно получить среднюю концентрацию электронов в наших условиях из выражения $j=en_e u_д$. На рис. 3, *б* показаны вычисленные зависимости концентрации электронов от E/p для двух смесей рабочих газов, содержащих пары ДМА с парциальным давлением 0,3 мм рт. ст. при $T=10°C$. Концентрация электронов

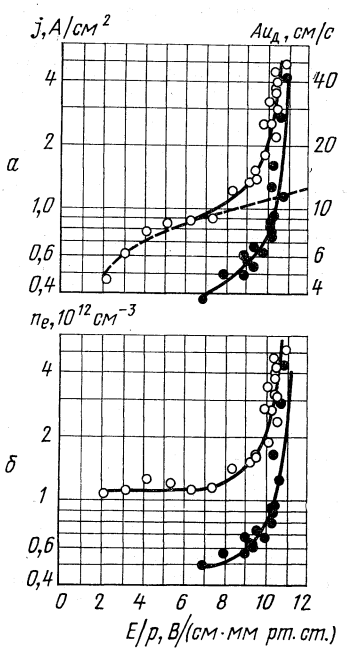

Рис. 3. Зависимости плотности тока объемного разряда (*а*) и концентрации электронов (*б*) от E/p при $p=1$ атм для смесей состава 1:2:3 (●) и 1:4:5 (○); пунктирна рис. 3, *а* — величина $Au_д$ при $A=1{,}87$ и $u_д$ из работы [9] в масштабе 10^6.

постоянна и при E/p=2—7 В/(см·мм рт. ст.) составляет для смеси 1 : 4 : 5 $n_e=1{,}1\cdot10^{12}$ см$^{-3}$. Дальнейшее увеличение напряженности поля приводит к резкому возрастанию n_e до $5\cdot10^{12}$ см$^{-3}$ при 11 В/(см·мм рт. ст.). Это возрастание может быть объяснено проявлением ионизационного (газового) усиления (ИУ) в области E/p 7 — 11В/(см·мм рт. ст.).

Для объемной ионизации коэффициент ионизационного усиления записывается как

$$k = J/J_0,$$

где J — ток при текущей E/p; J_0 — ток до наступления ИУ. В стационарном разряде

$$q_i + \alpha\, u_д n_e - \beta\, n_e^2 = 0,$$

где q_i — скорость образования электронов за счет фотоионизации; α — первый ионизационный коэффициент Таунсенда; $u_д$ — дрейфовая скорость электронов; β — коэффициент рекомбинации.

Концентрация электронов в условиях ИУ и рекомбинации находится из решения квадратного уравнения

$$n_e=\frac{\alpha u_д}{2\beta}+\sqrt{\frac{\alpha^2 u_д^2}{4\beta^2}+\frac{q_i}{\beta}}\,.$$

Используя $j=en_e u_д$ и $j_0=e\sqrt{q_i/\beta}\,u_д$, получаем

$$k=\frac{\alpha u_д/2\beta+\sqrt{\alpha^2 u_д^2/4\beta^2+q_i/\beta}}{\sqrt{q_i/\beta}}\approx\frac{\alpha u_д}{2\sqrt{q_i\beta}}+\frac{\alpha^2 u_д^2}{8q_i\beta}+1.$$

В первом приближении можно принять, что

$$k\approx1+\frac{\alpha u_д}{2\sqrt{q_i\beta}}\,.$$

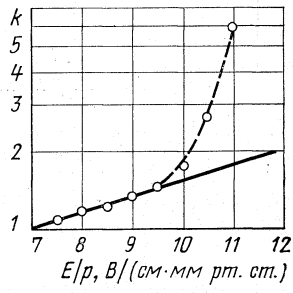

Рис. 4. Зависимость коэффициента ионизационного усиления от E/p.

На рис. 4 показаны экспериментальные значения k в зависимости от E/p. Видно, что в области 7—10 В/(см·мм рт. ст.) lg (k — 1) линейно зависит от E/p. Отклонение от линейности может происходить по причине как нарушения условия стационарности, так и изменения коэффициента рекомбинации. Рассмотрение осциллограмм показывает, что для $E/p\geqslant10$ В/(см×мм рт. ст.) на осциллограмме тока нет экстремума, а только точка перегиба при переходе объемного разряда в пробой, что свидетельствует в пользу предположения о нарушении условий стационарности при этих полях. Объяснение линейности lg (k—1)$\sim f$ (E/p) может заключаться в том, что $u_д$, q_i и β практически не зависят от поля, а коэффициент Таундсенда может быть представлен экстраполяционным выражением $\alpha=A\exp(\beta E/p)$, справедливым для $E/p\leqslant40$ В/(см·мм рт. ст.) [10]. Разумно предположить, что ИУ в наших условиях происходит на веществе с малым потенциалом ионизации, т. е. на ДМА (u_i=7,14 эВ). Подтверждением этому служит тот факт, что значения коэффициентов ИУ при E/p =8—11 В/(см·мм рт. ст.) для чистых N_2, CO_2 на несколько порядков ниже значений, наблюдаемых экспериментально в смеси с ДМА.

Генерация

При изучении генерации основное внимание уделялось следующим вопросам: порогу генерации по E/p и максимальному уровню вкладываемой и генерируемой энергии при разных давлениях рабочей смеси в пределах до атмосферного.

В первых экспериментах использовались электроды, близкие по форме к профилю Роговского, позволившие достичь E/p=13В/(см·мм рт. ст.) При дальнейшем повышении напряжения промежуток пробивался. В этих качественных опытах применялся резонатор, состоящий из глухого сферического (f=10 м) и плоского зеркал с отверстием в центре диаметром 0,5 см. Было обнаружено, что порог возникновения генерации 8В/(см·мм рт. ст.) коррелирует с ростом концентрации электронов при этом значении E/p, а область генерации попадает в область ИУ. Зависимость энергии от поля имела явно выраженный максимум и дальнейший спад при увеличении E/p. Это объясняется подобным же поведением величины вкладываемой энергии как функции поля вследствие сокращения длительности объемного разряда τ.

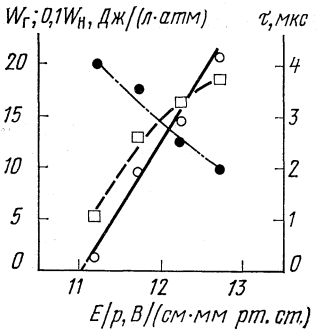

Рис. 5. Зависимости энергии накачки (□), энергии генерации (○) и длительности объемной стадии разряда (●) от E/p.

На резонаторе с плоским глухим зеркалом и плоскопараллельной пластинкой из германия была получена на термофотографической бумаге картина поля в ближней зоне. Наблюдалась мода TEM_{04} с размерами по горизонтали 0,5 см, что свидетельствовало о неполной накачке объема по ширине электродов. Причина этого — ослабление напряженности поля от центра электродов к краям и сильная зависимость n_e от E/p в режиме ИУ. В связи с высокими требованиями к однородности электрического поля в режиме ИУ в дальнейших опытах применялись плоские электроды, тыльная сторона и заваленные края которых защищались по всему периметру изоляционной окантовкой. Размеры плоских токопроводящих поверхностей составляли 2,5×44 см, расстояние между электродами было 2,8 см. Картина поля генерации в ближней зоне подтвердила, что применение таких электродов в режиме ИУ позволило добиться равномерного электрического поля по ширине электродов и увеличить ширину объема равномерной накачки до 2,5 см, т. е. до ширины токопроводящей поверхности.

Экспериментальные результаты для смеси 1 : 4 : 5, полученные с плоскими электродами, представлены на рис. 5. В работе использовался резонатор, состоящий из плоского глухого зеркала с золотым покрытием и германиевой пластинкой толщиной 0,5 см с удельным сопротивлением 45 Ом·см. Возрастание порога по E/p до 11 В/(см·мм рт. ст.) при применении германиевой пластинки объясняется меньшим отражением последней (R=0,55) по сравнению с зеркалом с отверстием в центре.

Важным вопросом является оптимизация вывода излучения лазера. С целью определения оптимальной прозрачности выходного зеркала резонатора были оценены вредные потери в нашем случае. Предполагалось, что к таким потерям относятся потери на поглощение в отражающем слое глухого зеркала и потери на поглощение в активной среде, содержащей пары ДМА. Бесполезные потери на глухом зеркале были приняты равными 2%. Поглощение в активной среде было измерено экспериментально с помощью CO_2-лазера ЛГ-23 со стабилизированным питанием и измерителя мощности ИМО-2. Результаты измерений в стандартных условиях эксперимента показали, что поглощение составляет 3,4% на длине лазерной кюветы, что в конечном виде для вредных потерь при одном прохождении фотона в резонаторе дает значение ~9%.

Для простоты оценки величины превышения энергии накачки над порогом будем считать постоянной температуру электронов при изменении E/p от 8 до 12,7 В/(см·мм рт. ст.). На слабую зависимость средней энер-

гии электронов от E/p указывают результаты работы [9]. Расчеты показывают восемнадцатикратное превышение энергии накачки над порогом при $E/p=12{,}7$ В/(см·мм рт. ст.). Используя выражение для оптимального коэффициента пропускания α [11] для случая лоренцева уширения линии в условиях нашего превышения над порогом, можно показать, что α_{opt} должно быть около 0,3. Применявшаяся пластинка с $\alpha=0{,}45$ имела пропускание, близкое к оптимальному. Осциллограмма временного хода генерации, полученная с помощью приемника «свод», и осциллограмма тока накачки представлены на рис. 2, *в*. Момент обрыва тока накачки соответствует наступлению пробоя. Несколько неожиданным является тот факт, что прекращение объемного разряда и переход на искровой пробой не обрывают импульс генерации. Объяснение следует искать в многократном превышении активного объема над объемом, занимаемым искрой, так как диаметр эрозионного следа пробоя не превышал 0,5 см.

1. В. М. Андрияхин, Е. П. Велихов, В. В. Васильцов, С. С. Красильников, В. Д. Письменный, И. В. Новобранцев, А. Т. Рахимов, А. Н. Старостин, В. Е. Хвостионов. *«Письма в ЖЭТФ»*, **15**, 637 (1972).
2. Н. Г. Басов, Э. Н. Беленов, В. А. Данилычев, А. Ф. Сучков. *«Квантовая электроника»*, под ред. Н. Г. Басова, № 3, 121 (1971).
3. O. P. Judd. *Appl. Phys. Letts*, **22**, 637 (1973).
4. I. S. Levine, A. Javan. *Appl. Phys. Letts*, **22**, 41 (1973).
5. I. V. Podmoshensky, V. P. Belosheev, I. I. Galaktionov, V. Y. Gorelov, Y. N. Kolpakov, I. V. Kosinskay, V. A. Pivovar. Tagung "Laser und ihre Anwendungen", Dresden, 1973.
6. C. Richardson, K. Leopold, A. Y. Alcock. *IEEE J.* **QE-9**, 934 (1973).
7. И. В. Подмошенский, А. М. Пухов, А. В. Яковлева. *ЖПС*, **19**, 624 (1973).
8. В. Е. Ильин, Л. И. Петрова, Е. П. Семенов. *«Оптико-механическая промышленность»*, № 8, 20 (1974).
9. I. I. Lowke, A. V. Phelps, B. W. Irwin. *J. Appl. Phys.*, **44**, 4664 (1973).
10. В. Л. Грановский. Электрический ток в газе. М., «Наука», 1971.
11. Ж. Бирнбаум. Оптические квантовые генераторы. М., «Сов. радио», 1967.

Поступила в редакцию
4 января 1976 г.

I. I. Galaktionov, V. Yu. Gorelov, I. V. Podmoshensky. **Electric and Emission Characteristics of the Photoionization CO_2 Laser.**

Electric and emission characteristics are presented of the photoionization CO_2 laser achieved under conditions of the laser cell separation from the light sources by the quartz tube. The ionization amplification is shown to occur in N,N-dimethylaniline vapors diluted in the laser mixture. The absorption losses in the dope vapors were measured to be 7% for a single path. The efficiency of 10% was achieved at the energy input of 180 J/(l·atm) into the volume discharge in the active volume of 0.32 l.