

55
A-55



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

Владимир Михайлович Андрияхин

ВОЗБУЖДЕНИЕ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЭНЕРГИИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

О1.04.04.- Физическая электроника
в т.ч. квантовая

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА • 1973

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте
Ядерной физики МГУ.

Научный руководитель - кандидат физико-математических
наук В.Д. Письменный

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Л.С. КОРНИЕНКО,
кандидат физико-математических наук
Г.П. КУЗЬМИН

Ведущая организация - Институт Атомной энергии им. И.В. Курчатова

Автореферат составлен " " _____ 1973 г.

Защита состоится " " _____ 1973 г. в _____ часов

на заседании секции № I Ученого Совета НИИЯФ и Отделения ядерной
физики физического факультета МГУ, адрес: г. Москва, Ленинские
горы, 19 корп. МГУ, аудит. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

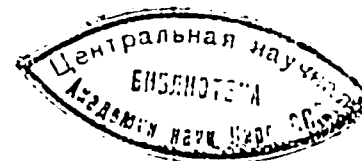
кандидат физико-математических наук

Е.А. РОМАНОВСКИЙ

302.12.1
А 55

Потребности технологии и современного крупномасштабного физического эксперимента стимулировали широкое развитие работ по созданию новых источников когерентного излучения. На протяжении последнего десятилетия был достигнут многократный рост мощности газовых лазеров, в значительной степени благодаря возможностям, открывшимся в связи с изобретением CO_2 -лазера. До создания лазеров с поперечным возбуждением электрозарядные лазеры эффективно работали лишь при низких давлениях - порядка нескольких тор /1/. Это связано с тем, что при более высоких давлениях оказывается невозможным поддержание в течение длительного времени равномерно протекающего разряда в условиях, когда проводимость среды определяется величиной приложенного электрического поля. Увеличение радиуса разрядной трубки также не приводит к увеличению мощности лазера из-за ограничения эффективного сечения разряда явлением контактирования /2/. Такое положение вызвало необходимость поиска новых способов возбуждения газовых лазеров, пригодных для работы с большим объемом газовой среды при высоком давлении. В результате экспериментальных и теоретических исследований было установлено, что этим требованиям полностью удовлетворяет комбинированная накачка лазеров (источником ионизации и электрическим полем) /3-7/. Использование мощных источников ионизации: продуктов ядерных реакций /7,8,14/, пучков заряженных частиц /3,5,6/, ультрафиолетового излучения /10/ позволили возбудить и получить генерацию на CO_2 в значительных объемах при давлениях рабочего вещества, намного превышающих атмосферное.

Настоящая диссертация посвящена экспериментальному исследованию возможностей, которые открывает использование ядерной энергии для непосредственного и комбинированного возбуждения газовых лазеров.

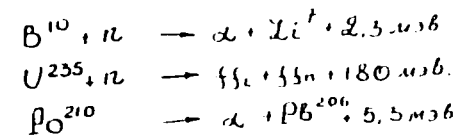


Рассмотрены результаты и обсуждены причины неудач экспериментов по прямому возбуждению CO_2 -лазера продуктами ядерных реакций /8/, описаны эксперименты по возбуждению нейтронами газовой смеси $\text{Nd}-\text{Ne}^{\text{B}}$ /9/. Основное внимание уделено экспериментам по комбинированному возбуждению лазера высокого давления на смеси $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{He}$ с использованием энергии ядерной реакции He^{B} (п,р) $\text{N}^{\text{B}} + 0,8 \text{ мэв}$. Все описанные в работе эксперименты проведены на импульсном источнике нейтронов (ИИН) института Атомной энергии им. И.В.Курчатова. Плотность потока тепловых нейтронов $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ н.см}^{-2}\text{сек}^{-1}$, длительность импульса $\sim 10^{-3} \text{ сек}$.

Диссертация состоит из пяти глав.

Первая глава начинается с краткого обзора существующих способов накачки газовых лазеров, большинство из которых возбуждается в процессе электрического разряда. Известно, что при использовании самостоятельного разряда для возбуждения газовых сред величина рабочего давления и объем разрядных камер оказываются ограниченными, что делает невозможным форсирование как удельных, так и интегральных характеристик газовых лазеров.

В качестве одного из подходов, в принципе, позволяющих избежать ограничений, связанных с наличием электрического поля, может рассматриваться способ возбуждения лазеров, при котором источником рождения электронов является энергия ядерных реакций. Возможно несколько способов наиболее эффективного использования ядерных реакций. Например, стенки разрядной камеры, в которой содержится рабочий газ, могут покрываться ядерно активным веществом (бором, полонием, ураном и т.д.). Под действием нейтронов или при радиоактивном распаде образуются продукты, способные ионизовать газ. При этом могут быть использованы реакции типа:



Возможно также использование ядерно активной газовой компоненты, которая входит в состав рабочей смеси лазера. Для CO_2 -лазера, например, такой компонентой является изотоп гелия - He^{B} (реакция $\text{He}^{\text{B}}(\text{n}, \text{p})\text{H}^{\text{B}}$).

Во второй главе диссертации дается описание экспериментов, в которых была предпринята попытка осуществить прямое возбуждение ядерной энергией смеси $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{He}$ в широком диапазоне давлений (от 10^{-2} до 3 атм). Установлено, что при удельной мощности энерговклада от 10^{-2} до $10^2 \text{ вт/см}^{\text{a}}$ возбудить генерацию не удается. Анализ механизма заселения колебательных уровней молекулярных газов электронами при ядерной накачке показал, что смеси на основе CO_2 не удовлетворяют критериям осуществления инверсной населенности /8/.

Третья глава диссертации посвящена теоретическому анализу возможности и экспериментальным результатам ядерной накачки смеси $\text{Nd}-\text{Ne}^{\text{B}}$ /9/. Высокое расположение рабочих уровней делает эту смесь мало чувствительной к перегреву. Кроме того, на переходе $7P_{3/2} - 7S_{1/2}$ иона ртути ($\lambda = 6150 \text{ \AA}$) наблюдается сверхизлучение, что указывает на значительную величину коэффициента усиления на этом переходе.

Работа проводилась с лазером, выполненным в виде металлического цилиндра, подогреваемого до необходимой температуры для создания нужного давления насыщенных паров ртути. В эксперименте общее давление составляло $100 + 500 \text{ тор}$. Резонатор образовывали зеркала: выходное - с диэлектрическим покрытием ($R \sim 3 \text{ м}$, $r \approx 98\%$ для $\lambda = 6328 \text{ \AA}$), глухое - плоское с золотым покрытием. Излучение

из резонатора по световоду направлялось на фотоумножитель (ФЭУ-36), перед фотокатодом которого устанавливался красный светофильтр ($\Delta\lambda \approx 100 \text{ \AA}$). Были предприняты необходимые меры защиты приемника от жестких компонент ядерного излучения, интенсивность которых определяла уровень шумов. Это обеспечило возможность регистрации полезного сигнала на уровне, превышающем 10^{-4} вт. В описанном эксперименте при общем давлении смеси 350 мм.рт.ст. и давлении ртути 3,5 мм.рт.ст. было зарегистрировано излучение мощностью 10 мвт, что значительно превышает мощность спонтанного излучения в видимом диапазоне.

Четвертая глава диссертации содержит описание экспериментов по созданию импульсных CO_2 -лазеров высокого давления с несамостоятельным разрядом, контролируемых потоком нейтронов /7/. Модельный эксперимент, выполненный на линейном ускорителе протонов ВГ-8 с CO_2 -лазером низкого давления (около 10 тор), обнаружил эффект резкого возрастания мощности генерации под влиянием слабобочного пучка протонов высокой энергии (ток ~ 10 мка, энергия $\sim 2,8$ мэв), переводящего разряд в режим самостоятельного горения /3/.

Увеличение мощности генерации в таких условиях объясняется сдвигом максимума функции распределения электронов по энергиям в область резонанса возбуждения лазерных уровней CO_2 -молекул, что обеспечивает резкое повышение КПД накачки. Известно, что основным механизмом заселения лазера на CO_2 является резонансная передача энергии от молекул N_2 и CO /11,12/, первые колебательные уровни которых непосредственно возбуждаются электронами. Следовательно, скорость заселения верхнего лазерного уровня молекул CO_2 можно записать в виде:

$$\Gamma(\text{CO}_2) - \Gamma(\text{N}_2) = N_0 n_e f\left(\frac{E_e}{\epsilon}\right) \sigma v$$

где N_0 - концентрация невозбужденных молекул азота;
 σ - резонансное значение сечения электронного возбуждения рабочих колебательных уровней;
 n_e - полная концентрация электронов со средней энергией $\langle E \rangle$;
 $n_e f\left(\frac{E_e}{\epsilon}\right)$ - концентрация электронов, энергия которых E_e лежит в области резонансного значения σ ;
 v - скорость электронов, соответствующая E_e .

В отсутствие пучка протонов электрическое поле в оптимальном режиме (максимальная генерация) подогревает электроны до энергии, несколько превышающей энергию (E_e), соответствующую области резонансного возбуждения рабочих колебательных уровней.

В оптимальном режиме максимально произведение $n_e f\left(\frac{E_e}{\epsilon}\right)$. Плотность электронов n_e определяет число быстрых ионизирующих электронов, поэтому произведение максимально, если функция распределения несколько сдвинута от E_e в сторону больших энергий. Так как значение $f\left(\frac{E_e}{\epsilon}\right)$ лежит вблизи максимума, то при изменении тока скорость возбуждения верхнего лазерного уровня пропорциональна плотности электронов, т.е. току.

Внешний ионизатор создает в газовой среде необходимую проводимость, освобождая от этой функции электрическое поле, роль которого теперь сводится к формированию необходимого для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня молекул CO_2 распределения электронов по энергиям. Возможность независимого изменения концентрации электронов и установления величины их средней энергии создает предпосылки для наиболее оптимальных условий работы

CO₂-лазера и более эффективного (по сравнению с самостоятельным разрядом) использования энергии электрического поля. Практические достоинства комбинированной накачки были продемонстрированы при переходе к режимам, характеризующимся высоким давлением рабочего вещества /5,6/.

Нами были проведены эксперименты на импульсном источнике нейтронов в центральном канале реактора, где поток тепловых нейтронов достигает величины $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ н. см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Лазер был выполнен в виде цилиндрической трубки из оргстекла с внутренним диаметром 37 мм, длиной 550 мм, внутри которой параллельно друг другу располагались два электрода из дюрала. Полированные поверхности электродов, обращенные друг к другу, имели размеры: $S = 500 \times 20 \text{ мм}^2$, расстояние между ними составляло 15 мм. Резонатор был образован сферическими металлическими зеркалами (золотое напыление на латунные подложки: $R_1 = 15 \text{ м}$, $R_2 = 3 \text{ м}$). Выходное зеркало имело центральное отверстие $\phi 4 \text{ мм}$ для вывода излучения. Эксперименты проводились со смесью газов CO₂-N₂-He³-He⁴ при различных соотношениях компонент и общем давлении смеси 2 + 2,5 атм. Значительное содержание He³ ($\sim 1 \text{ атм}$) создавало предпосылки для высокой проводимости среды, обеспечивающей мощность энерговыклада на уровне, при котором перегрев смеси происходил за время порядка нескольких микросекунд.

Характерные осциллограммы тока "холостых" разрядов и разрядов при работающем реакторе показаны на рис. 1 (а, б, в). Там же указан режим работы. В первом случае осциллограмма имеет вид периодических колебаний с периодом, равным периоду колебаний в электрическом контуре с закороченными электродами. В тех случаях, когда электрический разряд производится во время "вспышки" реакто-

ра (1б, в) осциллограмма тока свидетельствует о наличии фазы объемного протекания тока, длительность которой при прочих равных условиях чувствительна к газовому составу смеси.

Напряжение на конденсаторе выбиралось из тех соображений, чтобы режим горения разряда был оптимальным для возбуждения генерации в CO₂-лазере (E/P \sim 10 в/см.тор). Такой режим устанавливается на разрядном промежутке за время $\tau_L = L/R$, где L - индуктивность электрической цепи, а R - активное сопротивление газоразрядного промежутка, причем $R \gg R_0$ (R_0 - сопротивление электрической цепи при закороченных электродах). С другой стороны газовая среда может быть оптически активной лишь до тех пор, пока не произойдет разогрев газа. Характерное время этого разогрева $\tau_r = W/\delta E^2$, где δ - проводимость газоразрядной плазмы, W - удельная энтальпия газа, E - напряженность электрического поля.

Поэтому необходимо, чтобы выполнялось неравенство $\tau_L \ll \tau_r$. Проводимость газоразрядного промежутка можно найти из уравнения баланса для электронов, рождающихся в газе при торможении протонов, пробег которых в условиях эксперимента был мал по сравнению с поперечными размерами лазерной трубки.

Уравнение баланса электронов имеет вид:

$$\Pi \sigma_p \cdot N \cdot Q/I = \alpha n_e^2$$

Здесь Π - поток тепловых нейтронов; σ_p - сечение реакции He³ (п,р) H³ + 0,8 мэв; $I = 40 \text{ эв}$ - средняя энергия, необходимая для образования пары ион-электрон; $Q = 0,8 \text{ мэв}$ - энергия реакции He³ (п,р) H³; N - концентрация He³; $\alpha \approx 10^{-7} \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$ коэффициент диссоциативной рекомбинации.

Из этого уравнения следует, что $n_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и, следовательно, проводимость плазмы $\sigma = 10^9 \text{ ед. CGSE}$, а полное сопротивление газоразрядного промежутка $R = 15 \text{ ом} \gg R_0$. Отсюда видно, что величина τ_r (время, за которое газ разогревается) порядка нескольких микросекунд и, следовательно, длительность генерации также ограничивается этим временем. Зарегистрированная энергия излучения в этих экспериментах составляла около одного джоуля.

Эти результаты, продемонстрировав возможность использования ИИН в качестве мощного источника ионизации при комбинированной накачке CO_2 -лазера высокого давления, позволили поставить вопрос о создании квазистационарных CO_2 -лазеров высокого давления с самостоятельным разрядом с большим объемом резонатора. Для этого имелось две предпосылки: значительная длительность работы ИИН (\sim мсек) и, как это следовало из /13/, возможность резко снизить требования к уровню потока нейтронов, необходимому для поддержания режима самостоятельного горения газового разряда. Это позволило возбуждать газовые смеси потоками нейтронов вне ядерного реактора и резко увеличить объем рабочей среды.

В пятой главе диссертации изложены результаты работы по созданию и исследованию квазистационарного CO_2 -лазера высокого давления с самостоятельным разрядом /14/. Эксперименты были выполнены с разрядными камерами из оргстекла, которые образовывали полости прямоугольного сечения, внутри которых параллельно друг другу располагались сплошные, либо секционированные электроды из дюрала. Длина электродов изменялись от 40 до 120 см, ширина электродов и расстояние между ними — 1,5 до 5 см, а объем разрядной камеры — 100 см^3 до 3 литров. Использовались медные, а также золоченные зеркала с различными радиусами кривизны (от 3 до 15 м в зависимости от базы резонатора) для обеспечения каустики, макси-

мально приближенной к геометрии разрядных камер. Вывод лазерного излучения осуществляется через регулярно расположенные (с шагом в 1 см и ϕ 4 мм) отверстия в зеркале. Число отверстий изменялось в зависимости от площади поперечного сечения разрядной камеры от одного ($S = 1,5 \times 2,5 \text{ см}^2$) до 21 ($S = 5 \times 5 \text{ см}^2$). Временной ход излучения регистрировался приемником Ge:Li и осциллографировался. Измерение энергии производилось калориметром ИКТ-1.

Отношение напряженности электрического поля к давлению изменялось в диапазоне $E/P = 6 + 20 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{тор}}$. Одновременное осциллографирование тока, напряжения, а также светового сигнала позволили более точно определить условия развития и поддержания самостоятельного разряда в камере в течение времени, сравнимом со временем работы реактора. Энергия генерации в описываемых экспериментах изменялась в пределах 15–40 дж/литр, при объеме резонатора до 3 литров. Длительность генерации при этом изменялась от нескольких десятков до несколько сотен микросекунд.

Следует указать, что в ряде экспериментов генерация длилась несколько меньше, чем фаза объемного горения разряда. Прекращение генерации еще на стадии объемного горения, по-видимому, связано с уменьшением коэффициента усиления ниже порогового уровня в процессе нагрева газа.

Возможность помещать лазер в области с различным уровнем потока нейтронов, а также возможность изменять концентрацию He^3 в смеси газов, позволили изменять в широких пределах проводимость активной среды. Длительность импульса однородного протекания тока может быть связана, в частности, с временем нагрева газа, которое в приведенных экспериментах зависело от концентрации He^3 и величины E/P . Типичные осциллограммы тока и лазерного излучения при

различном парциальном содержании He^3 и энергетика показаны на рис. 2 и 3. Видно, что варьируя параметры электрической цепи (емкость, индуктивность) и проводимость среды (содержанием в смеси He^3 или потоком нейтронов), можно в широких пределах изменять длительность протекания объемной фазы горения разряда и длительность генерации.

Таким образом, экспериментально установлено, что импульсные ядерные реакторы типа ИИН могут быть использованы в качестве источников энергии для ионизации лазерных смесей и обеспечивать концентрацию электронов на уровне $10^{11} + 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Это позволяет осуществить объемное протекание электрического тока в режиме самостоятельного горения газового разряда в смеси $\text{CO}_2 - \text{M}_2 - \text{He}^3 - \text{He}^4$ при $E/P \sim 10 \frac{\text{в}}{\text{см.тор}}$ при атмосферном давлении в больших объемах рабочей среды с энергетикой на уровне нескольких квт/см^3 . Ввод такой мощности, как показывают эксперименты, обеспечивает создание оптической активной среды.

В заключении сформулируем основные выводы диссертации.

1. Экспериментально установлено, что при непосредственном воздействии продуктов ядерных реакций на смеси $\text{CO}_2 - \text{M}_2 - \text{He}$ при удельной мощности энергетика от 10^{-2} до 10^2 вт/см^3 и давлении газа от 10^{-2} до 3 атм возбудить генерацию не удается.

2. Анализ механизма заселения колебательных уровней молекул электронами показывает, что смеси на основе CO_2 не удовлетворяют критериям осуществления инверсной населенности при ядерной накачке.

3. С помощью ядерной накачки осуществлено возбуждение $\text{H}_2 - \text{He}^3$ смеси при общем давлении $\sim 350 \text{ мм.рт.ст.}$ и доли ртути $\sim 1\%$ и в красной области спектра получено излучение с мощностью, значительно большей мощности спонтанного излучения в видимой области.

10

4. Обнаружено резкое возрастание мощности генерации CO_2 -лазера низкого давления при переходе разряда под действием ионизатора (пучка быстрых протонов) в режим самостоятельного разряда. Дано теоретическое объяснение наблюдаемому эффекту.

5. Созданы и исследованы импульсные и квазистационарные CO_2 -лазеры высокого давления, работающие в режиме самостоятельного разряда, контролируемого потоком тепловых нейтронов импульсного ядерного реактора. Показано, что изменением величины потока и доли ядерно активной компоненты газовой смеси длительность генерации можно изменять от долей до сотен микросекунд.

6. Экспериментально показано сохранение оптической активности среды в CO_2 -лазере атмосферного давления, возбуждаемого комбинированным воздействием продуктов ядерных реакций и электрического поля, при уменьшении мощности электрической накачки до уровня в несколько квт/см^3 . Получен удельный энерговыход лазерного излучения на уровне до 40 дж/литр при объеме рабочей среды до 3 литров. Экспериментально обоснована возможность создания быстропотоковых CO_2 -лазеров высокого давления.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах /3/, /7/, /8/, /9/, /14/.

ЛИТЕРАТУРА

- /1/. Л. Аллен, Д. Джонс. Основы физики газовых лазеров. "Наука", 1970 г.
/2/. А.Т. Рахимов, Ф.Р. Улинич. ДАН СССР, 187, 72 (1962).
/3/. В.М. Андрияхин, Е.П. Великов, С.А. Голубев, С.С. Красильников, А.М. Прохоров, В.Д. Письменный, А.Т. Рахимов, Письма в АЭТ,

В. 346, 1968 г. С.А.Голубев, В.Д.Письменный, Т.В.Рахимова,
А.Т.Рахимов, *ЖЭТФ*, 62, 458, 1972 г.

/4/. А.А.Веденов, Е.П.Велихов, В.Д.Письменный, О возбуждении
лазеров ионизирующим излучением. Доклад на национальной межведом-
ственной конференции США по новым методам преобразования энергии.
Вашингтон, сентябрь, 1969 г.

/5/. С.А. Feinstechmachez, M.J. Kirk, K. Boyez. *Bull. Am Phys. Soc.*
16, 42, 1971 г.

/6/. Н.Г.Басов, Э.М.Беленов, В.А.Данилычев, А.Ф.Сучков,
Квантовая эл-ка, 3, 121, 1971 г.

/7/. В.М.Андрияхин, Е.П.Велихов, В.В.Васильцов, С.С.Красиль-
ников, И.В.Новобранцев, В.Д.Письменный, А.Т.Рахимов, А.Н.Староо-
тин, В.Е.Хвостюнов, Письма в *ЖЭТФ*, 15, 637, 1972 г.

/8/. В.М.Андрияхин, В.В.Васильцов, С.С.Красильников, В.Д.Пись-
менный, *ЖЭТФ*, т. 63, вып. 5 (II), 1972 г.

/9/. В.М.Андрияхин, Е.П.Велихов, В.В.Васильцов, С.С.Красиль-
ников, В.Д.Письменный, В.Е.Хвостюнов, Письма в *ЖЭТФ*, 12, 83,
1970 г.

/10/. O.P. Judd. *Appl. Phys. Lett.* 22, 95, 1973 г.

/11/. В.П.Тычинский, *УФН*, 91, № 3, 1967 г.

/12/. Н.Н.Соболев, В.В.Соновиков, *УФН*, 91, № 3, 1967 г.

/13/. Е.П.Велихов, С.А.Голубев, Ю.К.Земцов, А.Ф.Паль,
И.Г.Персианцев, В.Д.Письменный, А.Т.Рахимов, *ЖЭТФ*, т.65, № 2,
1973 г.

/14/. В.М.Андрияхин, Е.П.Велихов, А.С.Ковалев, В.Д.Письмен-
ный, А.Т.Рахимов, В.Е.Хвостюнов, Письма в *ЖЭТФ*, 18, №1, 1973 г.

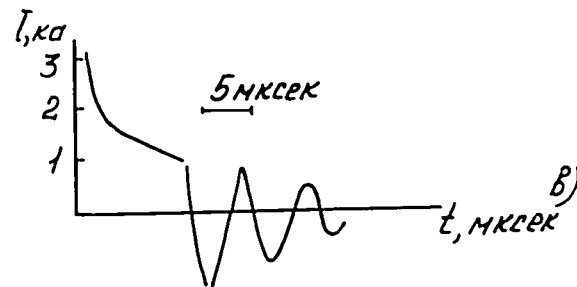
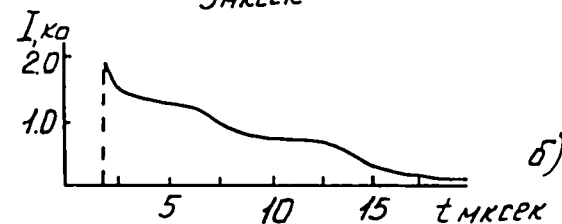
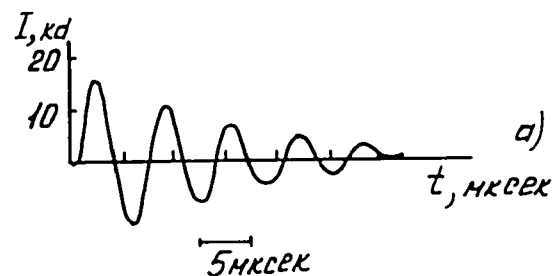


Рис.1. Осциллограммы тока разряда в нейтральной (а) и
ионизированной продуктами ядерных реакций (б, в)
газовой среде: а) $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}^3=0,8-0,7-1,0$ (атм);
 $I=36\text{кВ}$, $C=0,7\text{мкФ}$, $L=1,5\text{мкГн}$, $R=0,5\text{ом}$ (реактор
не работает); б) то же, но разряд синхронизован
со "вспышкой" реактора; в) $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}^3\text{-He}^4=0,3\text{-}$
 $0,6-0,8-0,3$ (атм), остальные условия те же, что
и в случае б).
 L, R — индуктивность и сопротивление электрической
цепи при замкнутых электродах.

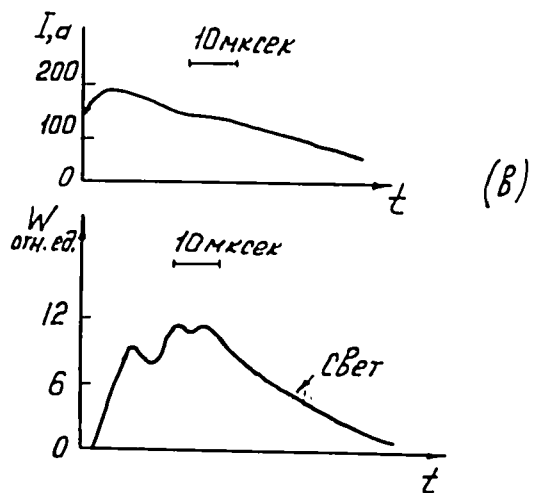
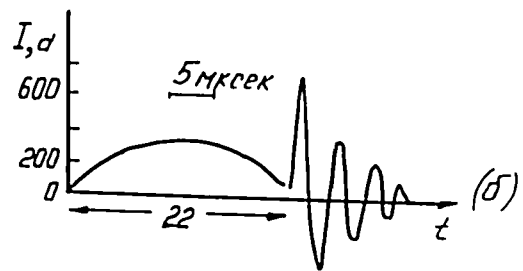
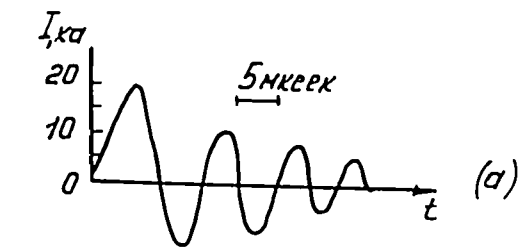


Рис. 2. Осциллограммы тока разряда и светового сигнала.
 а) $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{He}^3=75-150-530$ (тор), $I=20$ кв, $E/P=20$ в/см. тор, $C=0,7$ мкф; б) $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{He}^3-\text{He}^4=68-136-75-480$ (тор), $C=1,4$ мкф, $I=7$ кв, $E/P=7$ в/см. тор; в) $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{He}^3=75-600-75$ (тор), $C=2$ мкф, $E/P=7$ в/см. тор, плотность тока 2 а/см².

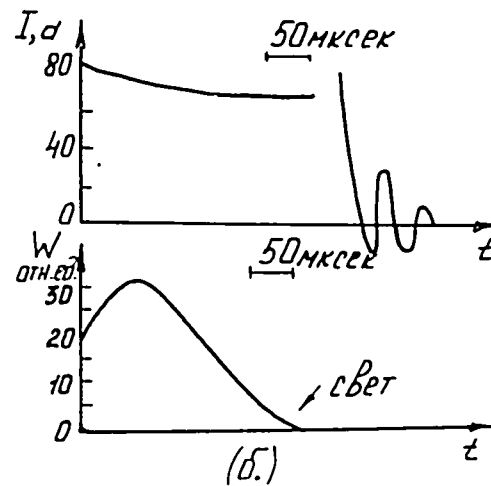
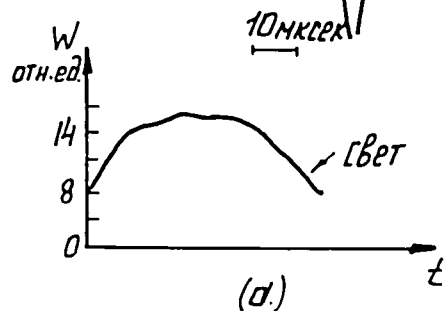
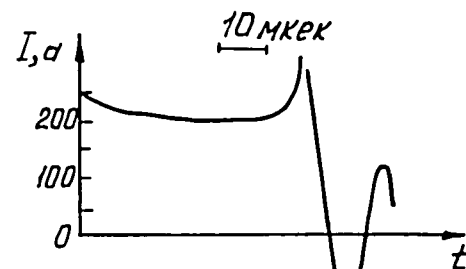


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда и светового сигнала.
 а) $\text{CO}-\text{N}_2-\text{He}^3=75-675-10$ (тор), $C=2,1$ мкф, $E/P=10$ в/см. тор, плотность тока $1,24$ а/см².
 б) $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{He}^3-\text{He}^4=150-300-40-240$ (тор), $C=4$ мкф, $E/P=6$ в/см. тор, плотность тока $0,43$ а/см².



ПОДП. К ПЕЧАТИ 20/Х1-73 Г. Л-137164. Ф. 60x90/10
Физ.пл. 1,0. ЗАКАЗ 2357. ТИРАЖ. 200 ЭКЗ.

ОТПЕЧАТАЮ НА РОТАПРИНТАХ В ТИП. ЮД. МГУ
МОСКВА, ЛЕНГОРЬ

