

темах с электронным пучком. Объём разряда в установках с УФ-предионизацией достигает неск. литров, энергия излучения — неск. сотен джоулей при длительности импульса ок. 1 мкс.

На рис. 8 показано поперечное сечение разрядной камеры лазера с ионизацией электронным пучком. Её важнейший элемент — импульсный диод (электронная пушка) —

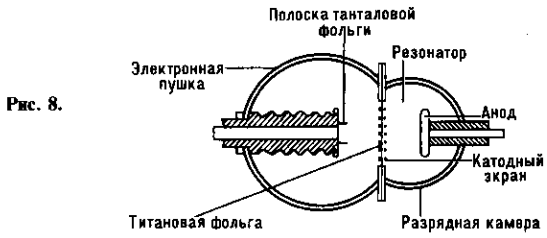


Рис. 8.

ускоритель электронов. Катод диода может быть термоэмиссионным, холодным с автоэлектронной эмиссией или плазменным. Плотности тока быстрых электронов от неск. А/см<sup>2</sup> до неск. мА/см<sup>2</sup> при длительности импульса от долей мкс до неск. десятков мкс. Диод отделен от разрядной камеры окном из тонкой титановой фольги. Междуэлектродный промежуток в установках подобного типа достигает 35 см, объём разряда — сотен л, энергия импульсов излучения — неск. кДж.

Показатель усиления в импульсных газоразрядных СО<sub>2</sub>-л. обычно составляет от 1,5 до 3—4 м<sup>-1</sup>. Импульсные СО<sub>2</sub>-л. успешно работают при давлениях до 10—15 атм. При давлении более 5—7 атм ударное уширение становится примерно равным интервалу между колебательно-вращат. линиями полос. Это позволяет получить плавную перестройку частоты во всём диапазоне, показанном на рис. 1. В непрерывном режиме применение трубок диаметром 1—2 мм (т. н. волноводные лазеры) даёт возможность работать при давлении до 0,2—0,4 атм и существенно расширить диапазон перестройки частоты за счёт ударного уширения линий.

**Газодинамические СО<sub>2</sub>-л.** Накачка СО<sub>2</sub>-л. может производиться за счёт тепловой энергии. В этом случае лазер является тепловой машиной, непосредственно преобразующей теплоту в когерентное излучение. При нагреве газа возбуждаются поступательные, вращательные и в меньшей степени — колебательные степени свободы молекул. Если газ резко охладить, то энергия колебат. степеней свободы может быть на нек-рое время «заморожена». Для быстрого охлаждения применяют сверхзвуковое истечение газа через сопла. Лазеры, в к-рых используют такой метод получения инверсной населённости, называют *газодинамическими лазерами* (ГДЛ). Время охлаждения τ\* можно оценить по высоте критич. сечения сопла h\* и скорости звука в нём c\*, τ\* ~ h\*/c\*. Если τ<sub>эфф</sub> > τ\*, но W<sub>20</sub>τ\* > 1, то при истечении энергия колебаний азота и антисимметричной моды СО<sub>2</sub> будет «заморожена», а энергия смешанных мод успеет перейти в тепловую. После расширения в газе в течение нек-рого времени будет существовать инверсная населённость. Для ускорения релаксации смешанных мод в рабочую смесь ГДЛ добавляют в небольшом кол-ве водяной пар. Условие образования инверсии в ГДЛ накладывает жёсткие ограничения на размер сверхзвуковых сопел. Они должны быть весьма миниатюрными, с высотой критич. сечения всего в неск. десятых мм. Чтобы получить значит. расход газа, применяют решётки из щелевых или конических сопел. Число сопел в решётках может достигать неск. сотен. Рабочую смесь ГДЛ получают в качестве продуктов сгорания топлив либо заранее приготовленную смесь нужного состава нагревают в теплообменниках, электрич. током в плазмотронах, в ядерных реакторах, в концентраторах солнечной энергии. ГДЛ представляют собой крупные энергетич. установки. Описан пример реализации ГДЛ с расходом рабочей смеси 14 кг/с и мощностью излучения до 150 кВт. Вероятно, существуют и бо-

лее крупные установки. Первоначально создание ГДЛ мотивировалось в осн. военными целями, но они могут успешно применяться и в технологиях отраслей тяжёлой промышленности. На рис. 9 изображён ГДЛ, установленный в одном из цехов Череповецкого металлургич. комбината. Он разработан в Ин-те высоких температур РАН.

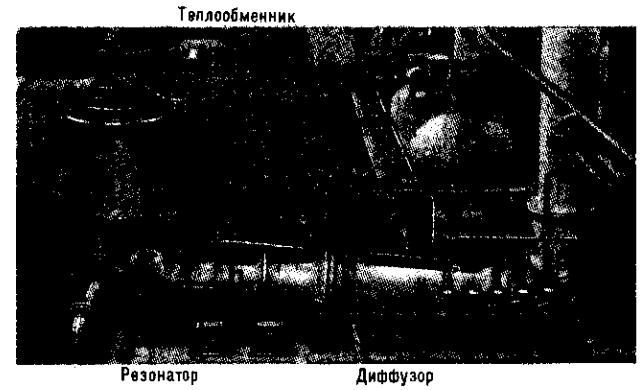


Рис. 9.

Определённым недостатком ГДЛ является низкий (< 1%) КПД, связанный с неселективностью тепловой накачки. Оценить мощность ГДЛ можно из следующих соображений. Учитывая, что рабочая смесь ГДЛ на 98—99% состоит из СО<sub>2</sub> и азота, при темп-ре нагревателя T<sub>0</sub> на единицу массы газа приходится энергия колебаний молекул азота и антисимметричной моды СО<sub>2</sub>

$$\mathcal{E}_x = \frac{R\theta}{\mu} [\exp(\theta/T_0) - 1]^{-1},$$

где θ = 3380 К — характеристическая темп-ра антисимметричной моды, R — универсальная газовая постоянная, μ — молекулярная масса. Мощность генерации составит  $W = \dot{m} \mathcal{E}_x \eta_c \eta_{ex} \eta_{ген} \eta_{диф}$ , где η<sub>c</sub> — КПД сопла, равный отношению энергии, запасённой в колебаниях молекул азота и антисимметричной моды СО<sub>2</sub> после расширения в сопле, к величине  $\mathcal{E}_x$ ,  $\dot{m}$  — массовый расход газа. Остальные обозначения приведены выше при оценке мощности газоразрядных лазеров. Величина η<sub>c</sub> зависит от высоты критич. сечения сопла, его геометрии и качества изготовления, состава смеси, T<sub>0</sub> и ряда др. факторов и может достигать 0,4—0,5. В оптимальных условиях при T<sub>0</sub> = 1200—1300 К величина W/ṁ составляет 8—12 кВт/(кг/с). Она очень сильно зависит от T<sub>0</sub>. Осн. усилия при разработках ГДЛ были направлены на её повышение. Однако это связано с большими технол. трудностями.

**Химические СО<sub>2</sub>-л.** Накачка СО<sub>2</sub>-л. может производиться непосредственно за счёт хим. энергии тех реакций, к-рые протекают с большой скоростью с высоким выходом колебательно возбуждённых молекул. Примером такой реакции является взаимодействие фтора с водородом или дейтерием. Фтористый дейтерий быстро обменивается энергией с антисимметричной модой СО<sub>2</sub>. При этом образуется инверсная населённость. На рис. 10 показана схема хим. СО<sub>2</sub>-л. В камеру сгорания по отд.

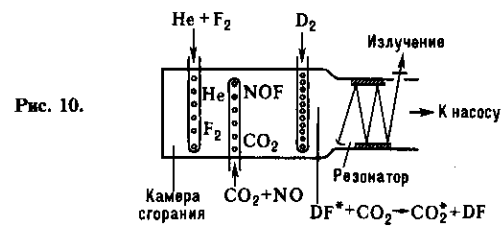


Рис. 10.