

Письма в ЖЭТФ, том 13; стр. 116 – 120

20 июня 1971 г.

**О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ИНВЕРСНОЙ СРЕДЫ
ДЛЯ ЛАЗЕРОВ ПОСРЕДСТВОМ ВЗРЫВА**

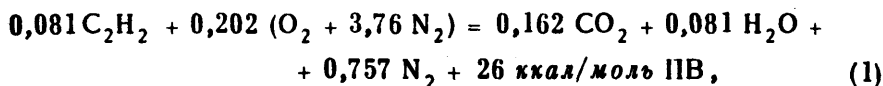
В. М. Марченко, А. М. Прохоров

В газодинамических лазерах (ГДЛ) и усилителях инверсия населенности колебательных состояний некоторых молекул возникает в резуль-

тате быстрого расширения предварительно нагретой смеси молекулярных газов [1 – 8]. Состав газовой смеси выбирается таким, чтобы при ее расширении для времен столкновительной релаксации τ_1 и τ_2 конечного 1 и начального 2 лазерных уровней выполнялось условие $\tau_1 \ll \tau_2$ [9]. Кроме того, скорость расширения должна быть достаточно большой, чтобы опустошение уровня 2 вследствие релаксации происходило медленнее, чем в результате адиабатического охлаждения газовой смеси.

В настоящей работе для получения инверсии населенности колебательных уровней молекул предлагается использование нового класса сильноэкзотермических химических реакций, сопровождающихся взрывом. Показано, что при свободном разлете продуктов взрыва (ПВ) некоторых взрывчатых веществ (ВВ) могут быть реализованы выше указанные условия без применения газодинамических приспособлений типа сопла или шели.

Задача заключается в выборе ВВ, ПВ которых имеют газовый состав, позволяющий осуществить требуемую релаксационную схему, аналогичную, например, применяемой в известных ГДЛ [2, 10, 11]. Этим требованиям может удовлетворить ряд газообразных и конденсированных ВВ [12, 13]. Скорость разлета ПВ, нагретых в зависимости от вида ВВ до $(2 + 5) \cdot 10^3$ °К, достигает $10^5 + 10^6$ см/сек, т. е. сравнима и даже превышает скорость газового потока в ГДЛ. Взрывная реакция стехиометрического состава ацетилено-воздушной смеси [14]:



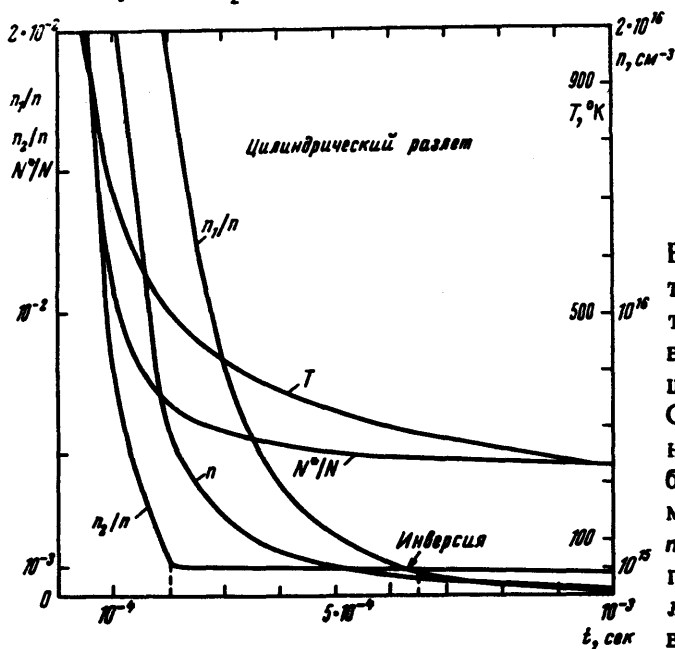
может служить иллюстрацией предложения.

Рассмотрим подробнее физико-химические процессы, протекающие при взрыве [12 – 15], ограничившись случаем цилиндрической симметрии. Пусть в трубке диаметром d , заполненной смесью C_2H_2 и воздуха, возбуждается детонационная волна. Известно [14], что при давлении выше 0,5 атм в исходной смеси с объемной концентрацией 8 – 14% C_2H_2 при искровом воспламенении наблюдается переход горения в детонацию в трубках с $d \geq 18$ мм. Скорость детонационной волны слабо зависит от давления и равна $1,8 \cdot 10^5$ см/сек. На фронте детонационной волны протекает экзотермическая химическая реакция, которая поддерживает существование волны. В результате реакции образуются ПВ, которые полностью перемешаны и, предполагается, являются смесью идеальных газов с составом, соответствующим уравнению реакции (1). Температура пламени стехиометрической ацетилено-воздушной смеси порядка 2000 – 2400 °К. Нагретые ПВ находятся под избыточным давлением, которое зависит от исходного.

Если трубка не прочная, то после того как до нее дойдет детонационная волна ПВ начнут расширяться в окружающее пространство, образуя поле взрыва. Расширение является адиабатически быстрым процессом и сопровождается охлаждением ПВ. Предположим, что расширя-

ущееся со временем поле взрыва можно приближенно описать усредненными по его объему параметрами состояния. В то же время будем считать, что скорость расширения определяется скоростью разлета ПВ за фронтом детонационной волны, величина которой по расчетам порядка $0,9 \cdot 10^5$ см/сек.

При цилиндрическом разлете ПВ воздушной смеси C_2H_2 в пустоту параметры состояния изменяются таким образом, что может возникнуть инверсия населенности колебательных состояний $2(00^0 1)$ и $1(10^0 0)$ молекулы CO_2 .



Временная зависимость температуры (T) продуктов взрыва ацетиленовоздушной смеси, концентрации молекул $CO_2(n)$ и относительной населенности возбужденных состояний молекул $CO_2(n_1/n, n_2/n)$ и азота (N^*/N) при цилиндрическом разлете. Начальные условия даны в тексте.

Релаксация возбужденных молекул CO_2 приближенно описывается кинетическими уравнениями:

$$\frac{dn_a}{dt} = W_{N^*-C} N^* n_0 \delta_{2a} - \frac{n_a}{\tau_a(t)}, \quad (2)$$

где $a = 1, 2$, δ_{2a} — символ Кронекера, N^* , n_0 , n_a — концентрация возбужденных молекул азота, молекул CO_2 в основном и a -состоянии, W_{N^*-C} — вероятность передачи возбуждения от молекулы азота к CO_2 , а $\tau_a(t)$ — время столкновительной релаксации.

Для заданной геометрии разлета можно вычислить временную зависимость температуры газа и концентрации молекул. Используя также данные по температурной зависимости вероятности столкновительной релаксации молекулы CO_2 [16], можно найти и $\tau_a(t)$.

Следует иметь в виду, что при температуре ниже $1000^\circ K$ релаксация возбужденных молекул CO_2 обусловлена, главным образом, столкновениями с молекулами H_2O и более вероятна для нижнего уровня. Однако, вследствие большой относительной концентрации воды времена релаксации малы и поэтому при давлениях в исходной смеси выше

1 атм релаксация протекает быстрее, чем охлаждается газ. В то же время при давлениях ниже 0,5 атм в ацетилено-воздушной смеси не возбуждается детонация. В связи с этим были выбраны следующие начальные условия: ацетилено-воздушная смесь под давлением 0,5 атм заполняет трубку с $d = 2$ см, после взрыва происходит цилиндрический разлет ПВ, нагретых до $T_0 = 2200^\circ \text{K}$.

Для качественного анализа временной зависимости населенности возбужденных состояний можно проинтегрировать кинетические уравнения, игнорируя передачу энергии от азота к CO_2 и аппроксимируя $r_\alpha(t)$ показательными функциями. Оказывается, что при заданных начальных условиях релаксация уровня 1 протекает быстрее, чем опустошение этого уровня вследствие охлаждения газа. Следовательно, его населенность определяется бальмановским фактором. В то же время релаксация уровня 2, начиная с некоторого момента, протекает медленнее и происходит отрыв колебательной температуры от температуры хаотического движения в газе.

Результаты вычисления зависимости плотности населенности уровней 1 и 2 от времени показаны на рисунке. Отрыв колебательной температуры уровня 2 происходит на 200 мксек, а инверсия населенности возникает через 650 мксек после начала разлета. Временная зависимость плотности населенности возбужденного уровня азота определяется в основном релаксацией при столкновении с молекулами CO_2 и показана на том же рисунке. При учете передачи энергии от азота к CO_2 инверсия должна быть больше и наступить раньше, а кроме того, она может иметь место при больших давлениях в исходной смеси.

Значительное увеличение инверсии возможно при использовании ВВ с меньшей относительной концентрацией воды в ПВ. В то же время углеводородные и воздушные смеси могут оказаться весьма эффективными для получения инверсии при разлете продуктов сгорания или их истечении через сопло.

Авторы выражают благодарность Ю.Б.Коневу и В.К.Конюхову за обсуждение результатов работы.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 мая 1971 г.

Литература

- [1] В.А.Конюхов, А.М.Прохоров. Авторское свидетельство №223954, приоритет 19/XI-1966, Б.И., №25, 1968; Письма в ЖЭТФ, 3, 436, 1966.
- [2] В.К.Конюхов, И.В.Матросов, А.М.Прохоров, Д.Т.Шадун, Н.Н.Широков. Письма в ЖЭТФ, 12, 461, 1970.
- [3] Н.Г.Басов, А.Н.Ораевский, В.А.Щеглов. ЖТФ, 37, 339, 1967.
- [4] D. M. Kuehn, D. J. Monson. Appl. Phys. Lett., 16, 48, 1970.
- [5] А.П.Дронов, Е.М.Кудрявцев, Н.Н.Соболев, А.С.Дьяков. Письма в ЖЭТФ, 11, 516, 1970.

- [6] В. R. Bronfin, L. R. Voedeker, J. P. Cheyer. Appl. Phys. Lett., 16, 214, 1970.
- [7] А.С.Бирюков, Б.Ф.Гордиец, Л.А.Шелепин. Препринт ФИАН №41, 1969.
- [8] А.С.Бирюков, Л.А.Шелепин. ЖТФ, 40, 2575, 1970.
- [9] Н.Г.Басов, А.Н.Ораевский. ЖЭТФ, 44, 1742, 1963.
- [10] Laser Focus, 6, №7, 16, 1970.
- [11] E.Gerry. Laser Focus, 6, №12, 27, 1970.
- [12] Ф.А.Баум, К.П.Станюкович, Б.И.Шехтер. Физика взрыва. М., ГИФМЛ, 1959.
- [13] К.К.Андреев, А.Ф.Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., ГНТИ Оборонгиз, 1960.
- [14] Б.А.Иванов. Физика взрыва ацетилена. М., Изд. Химия, 1969.
- [15] Я.Б.Зельдович, А.С.Компанеец. Теория детонации, М., ГИТТЛ, 1955.
- [16] R.L.Taylor, S.Bitterman. Rev. Mod. Phys., 41, 26, 1969.
-