

жалению, прямой связи коротковолнового поглощения каждого вида кристалла с какими-либо конкретными примесями, ответственными за разрушение, установить не удалось. Для выяснения природы этих примесей необходим тщательный анализ их состава в образцах на уровне 10^{-7} — 10^{-8} моль/моль.

Исследование морфологии разрушения под микроскопом показывает, что зона разрушения состоит из локальных очагов, а это, в свою очередь, дополнительно свидетельствует в пользу механизма разрушения на включениях. Кроме того, абсолютные значения пороговых интенсивностей значительно ниже величин, ожидаемых для порогов разрушения в идеально чистых материалах [7].

На основании полученных результатов, а также результатов работ [4, 5] можно утверждать, что наблюдаемая зависимость может быть использована как метод неразрушающего контроля лучевой прочности высококачественных оптических кристаллов в широком диапазоне длин волн воздействующего излучения — от видимого (0,69 мкм) до инфракрасного (10,6 мкм). Широкий диапазон длин волн, в котором наблюдается такая корреляция, а также морфология разрушений указывают на то, что определяющим механизмом разрушения является поглощение на посторонних включениях и примесях.

В заключение авторы выражают глубокую признательность д-ру Р. Воска из Исследовательской Лаборатории физики кристаллов (Венгерская АН) и И. С. Лисицкому и д. С. Миронову (ГИРЕДМЕТ) за предоставление образцов.

1. R. W. Horner, D. R. Uhlmann. *J. Appl. Phys.*, **41**, 4023 (1970).
2. R. Voszka, K. Raksanyi, J. Földari. *Kristall und Technik*, **8**, 1347 (1973).
3. R. W. Christy, J. D. Dimock. *Phys. Rev.*, **141**, 806 (1966).
4. Н. В. Волкова, Г. П. Гусев, П. Н. Цирульник, А. В. Шатилов. «*Оптико-механическая промышленность*», **10**, 31 (1973).
5. Н. В. Волкова, *ФТТ*, **16**, 307 (1974).
6. В. И. Ковалев, В. В. Морозов, Ф. С. Файзуллоев. «*Квантовая электроника*», **1**, 2172 (1974).
7. Н. Бломберг. «*Квантовая электроника*», **1**, 786 (1974).

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР, Москва

Поступило в редакцию
8 июля 1976 г.

V. I. Kovalyov, F. S. Faizulloev. **An Effect of the Short-Wavelength Absorption on the Threshold of Crystal Bulk Damage on Exposure to the Pulsed CO₂ Laser Radiation.**

Correlation has been found between thresholds of bulk damage in NaCl, KCl and KPC-6 crystals on exposure to the pulsed CO₂ laser radiation and transmission of these crystals in the vicinity of the short-wavelength transparency limit. It is shown that this correlation may be used as a method for nondestructive inspection of the beam strength of materials for high-power infrared lasers.

«Квантовая электроника», **4**, № 2 (1977)

УДК 621.378.3

Н. П. Дацкевич, Е. К. Карлова, Н. В. Карлов, Б. М. Ковальчук, Ю. Б. Конев, Н. Н. Кононов, И. В. Кочетов, Г. П. Кузьмин, Г. А. Месяц, С. М. Никифоров, В. Г. Певгов, А. М. Прохоров

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ СО₂-ЛАЗЕР С НЕУСТОЙЧИВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Развитие метода внешней ионизации рабочего объема СО₂-лазеров пучком ускоренных электронов позволило создать генератор при атмосферном давлении газа с объемом активной среды 270 л [1]. Серьезным препятствием для увеличения энергетических параметров установок подобного типа является отсутствие оптических элементов, обеспечивающих съем энергии со всего объема лазера. Так, энергия 5 кДж была получена [1] при использовании в качестве выходного зеркала кристалла КРС-6 (ТС1—ТВr) диаметром 230 мм при поперечном сечении активной среды 30×30 см. Лучевая прочность существующих полупрозрачных материалов не позволяет делать установки при атмосферном давлении газа, если их длина превышает 3—4 м [1]. Увеличение поперечных размеров ограничено отсутствием крупногабаритных полупрозрачных окон.

В настоящее время доступны кристаллы ВаF₂ диаметром до 450 мм. Они не могут быть использованы в качестве полупрозрачных зеркал из-за малого коэффициента отражения (менее 4% от одной грани). Применяя неустойчивый резонатор с металлическими

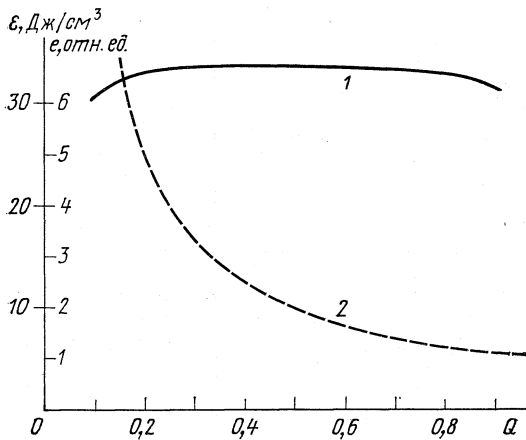


Рис. 1. Зависимость удельного энергосъема ε (1) и плотности энергии излучения на выходе резонатора e (2) от коэффициента связи.

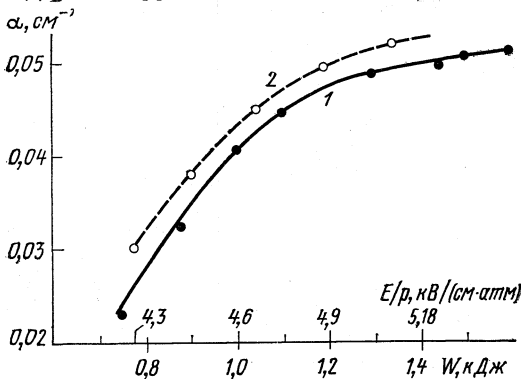


Рис. 2. Зависимость показателя усиления для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=2:1:3$ от удельного энерговклада: 1 — эксперимент, 2 — расчет.

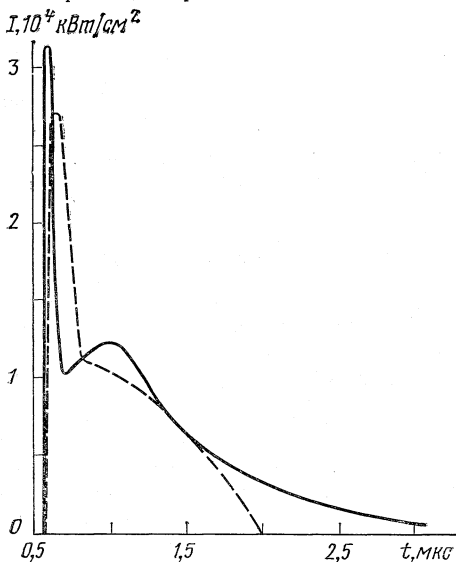


Рис. 3. Форма импульса излучения: сплошная кривая — теория; штриховая — эксперимент.

зеркалами, можно использовать BaF_2 в качестве материала для выходных окон. Важно, что неустойчивые резонаторы позволяют получить почти дифракционную расходимость излучения при большом объеме активной среды [2, 3]. Эксперименты на ТЕА CO_2 -лазерах подтверждают эту возможность [4].

Достаточно большой коэффициент поглощения BaF_2 на длине волны 10,6 мкм (около 10% на 1 см) не служит серьезным препятствием для работы с этим материалом в импульсном режиме.

Важным обстоятельством при расчете неустойчивого резонатора для установки с энергетическими характеристиками, подобными [1], является тот факт, что приходится исходить не только из оптимизации по энергосъему, но и учитывать соображения по обеспечению наименьшей лучевой нагрузки на зеркала и выходное окно лазера.

Чтобы определить, в какой мере изменяются энергетические характеристики лазера в зависимости от коэффициента связи резонатора, были выполнены расчеты, в которых использовались кинетические уравнения для средних чисел квантов молекул азота, антисимметричного и деформационного типов колебаний молекул углекислого газа [5], уравнение для температуры газа и уравнение баланса числа фотонов в резонаторе. Температуры симметричного и деформационного типов колебаний CO_2 считались одинаковыми. Константы скорости обмена квантами между молекулами азота и углекислого газа, релаксации антисимметричного и деформационного типов колебаний углекислого газа, а также их зависимость от температуры были взяты из работ [6—8]. Мощность накачки определялась по измерениям напряжения и тока разряда. Энергия электронов в плазме вычислялась путем численного решения кинетического уравнения для симметричной составляющей функции распределения электронов по энергиям [9—11]. Коэффициент связи неустойчивого резонатора был определен в приближении геометрической оптики, $Q=1-1/M^2$, где M — коэффициент увеличения резонатора.

На рис. 1 показана зависимость удельного энергосъема ε и плотности энергии излучения e на выходе резонатора от коэффициента связи конфокального неустойчиво-

го резонатора. Расчет выполнен для условий эксперимента: смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 3$, удельный энерговыход $0,13 \text{ Дж/см}^2$, отношение напряженности поля к плотности молекул $E/N = 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$. Коэффициент отражения зеркал был принят $R=0,98$. В интервале $Q 0,2-0,9$ удельный энерговыход практически не зависит от коэффициента связи. Таким образом, оптимизация резонатора для условий нашего эксперимента не является актуальной задачей и нами не производилась. В конфокальном резонаторе при фиксированном внешнем диаметре выходного луча чем больше увеличение, тем больше площадь поперечного сечения луча. Так как энергия излучения в широком диапазоне практически не зависит от Q , из соображений лучевой стойкости зеркал и выходного окна выгодно работать при возможно большем увеличении (рис. 1). Зависимость плотности энергии излучения e от Q имеет вид $e \sim 1/Q$.

Слабая зависимость удельного энерговыхода от коэффициента связи обусловлена большой величиной усиления лазера. Измерения показателя усиления были выполнены на установке меньшего размера [12]. Результаты измерений для смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 2 : 1 : 3$ в зависимости от удельного энерговыхода показаны на рис. 2. На этом же рисунке представлена расчетная зависимость. Максимальная величина показателя усиления достигает $0,05 \text{ см}^{-1}$.

Неустойчивый резонатор, использованный в экспериментах, был образован вогнутым зеркалом с радиусом кривизны 20 м и диаметром 450 мм и выпуклым выходным зеркалом радиусом кривизны 9,1 м и диаметром 140 мм. Расстояние между зеркалами составляло 5,45 м, при этом резонатор был конфокальным.

Окно из BaF_2 диаметром 450 мм было установлено под небольшим углом к оптической оси резонатора, чтобы избежать появления сходящейся волны [3]. Выпуклое зеркало изготовлено из латуни и закреплено на трех распорках по центру резонатора. В экспериментах с этим резонатором была получена энергия излучения 7,5 кДж в импульсе длительностью около 1 мкс по основанию. Максимальная плотность энергии достигала 25 Дж/см^2 . Удельный энерговыход с учетом заполнения активного объема излучением составлял $0,28-0,32 \text{ Дж/см}^2$ и хорошо согласовывался с результатами расчета (коэффициент связи резонатора в приближении геометрической оптики $Q=0,79$).

Следует отметить, что при использовании вогнутого зеркала из стекла с золотым покрытием происходит его постепенное выгорание. Цельнометаллические зеркала (в частности, из латуни) работают практически без разрушения.

Оциллограмма импульса излучения показана на рис. 3. В неустойчивом резонаторе излучение пространственно когерентно, отсутствуют эффекты «разгорания» поперечных мод высоких порядков [13], которые ведут к размытию и удлинению передней части импульса. Импульс имеет четко выраженный передний пик длительностью 150—200 нс, в котором содержится значительная часть всей энергии. На рис. 3 показан импульс излучения, полученный в результате расчета для условий эксперимента. Форма импульса довольно хорошо совпадает с экспериментальной, но длительность переднего пика в эксперименте несколько больше. Следует отметить, что использование уравнений для средних чисел квантов для расчета формы импульса не вполне оправдано, так как при быстрых изменениях населенностей в процессе генерации возможно нарушение бальмановского распределения в системе нижних уровней.

Таким образом, в настоящей работе при использовании неустойчивого резонатора получена энергия импульса излучения CO_2 -лазера с несамостоятельным разрядом 7,5 кДж. Этот результат является лучшим из известных нам в настоящее время. Показано, что существует хорошее совпадение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, что позволяет надежно прогнозировать энергетические характеристики установок подобного типа. Следует подчеркнуть, что при разработке резонаторов мощных лазерных систем необходимо принимать во внимание лучевую прочность оптических элементов.

1. Ю. И. Бычков, Е. К. Карлова, Н. В. Карлов и др. «Письма в ЖТФ», 2, 212 (1976).
2. A. E. Siegman. *Proc. IEEE*, 53, 277 (1965).
3. Ю. А. Ананьев. «Квантовая электроника», под ред. Н. Г. Басова, № 6, 3 (1971).
4. H. Sganek, A. J. Mogeny. *Appl. Optics*, 13, 368 (1974).
5. Б. Ф. Гордиец, А. И. Осипов, Е. В. Ступоченко, Л. А. Шелепин. *УФН*, 108, 655 (1972).
6. W. A. Rosser, A. D. Wood, E. T. Gerry. *J. Chem Phys.*, 50, 4996 (1969).
7. А. С. Бирюков, В. К. Конюхов, А. И. Луковников, Р. И. Сериков. *ЖЭТФ*, 66, 1248 (1974).
8. R. L. Taylor, S. Bitterman. *Rev. Mod. Phys.*, 41, 26 (1969).
9. T. Holstein, *Phys. Rev.*, 70, 367 (1946).
10. W. L. Nighan. *Phys. Rev. A.*, 2, 5 (1970).
11. J. J. Lowke, A. V. Phelps, B. W. Irwin. *Appl. Phys.*, 44, 4664 (1973).

12. П. С. Бугаев, Ю. И. Бычков, Е. К. Карлова и др. «Письма в ЖТФ», 1, 492 (1975).

13. В. С. Летохов, А. Ф. Сучков. ЖЭТФ, 50, 1148 (1966).

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР,
Москва

Поступило в редакцию
22 июля 1976 г.

N. P. Datskevich, E. K. Karlova, N. V. Karlov, B. M. Kovalchuk, Yu. B. Konev, N. N. Kononov, I. V. Kochetov, G. P. Kuzmin, G. A. Mesyats, S. M. Nikiforov, V. G. Pevgov, A. M. Prokhorov. **Unstable-Resonator High-Power Pulsed CO₂ Laser.**

Investigations are reported of a pulsed CO₂ laser with the semi-self-sustained discharge. The pulse energy of 7.5 kJ was achieved using an unstable resonator. Calculations are made of the dependence of the energy characteristics on the resonator coupling coefficient. It is shown that the results of theoretical calculations are in good agreement with experimental data.

«Квантовая электроника», 4, № 2 (1977)

УДК 621.378.33+535.88

Е. М. Золотов, В. М. Пелехатый, А. М. Прохоров, Е. В. Ракова, С. А. Семилетов, С. М. Шкорняков, Е. А. Щербаков

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ТОНКОПЛОЧНЫЙ ДЕФЛЕКТОР В LiNbO₃

Взаимодействию световых поверхностных волн (СПВ) с акустическими поверхностными волнами (АПВ) посвящен ряд работ [1—4]. Цель подобных исследований — создание малогабаритных тонкопленочных модуляторов и дефлекторов света, являющихся важными элементами интегральной оптики. В качестве волноводных сред применялись материалы с высокими акустооптическими свойствами. Одним из перспективных кристаллов, используемым для создания подобных устройств, является LiNbO₃, в котором различными методами можно изготавливать оптические волноводы с малыми потерями [5, 6].

Данная работа посвящена созданию тонкопленочного акустооптического дефлектора света в ниобате лития. Оптический волновод был изготовлен на поверхности Y-среза кристалла LiNbO₃ путем диффузии Ti [7]. Для этого на поверхность напылялся слой Ti толщиной ~60 нм, далее подложка отжигалась в печи в атмосфере аргона при температуре ~960° в течение шести часов. В результате были получены оптические диффузные волноводы, в которых в направлении оси X могли распространяться три поверхностные свето-

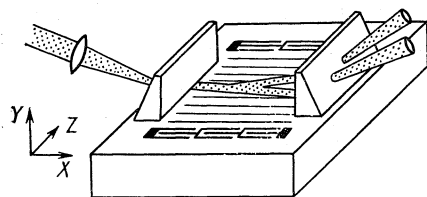


Рис. 1. Схема эксперимента.

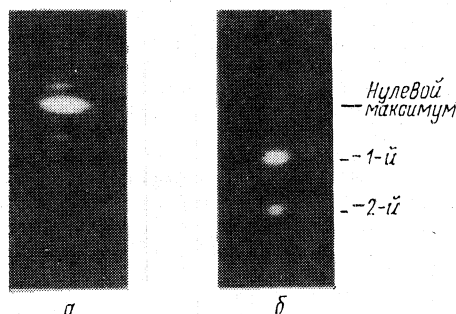


Рис. 2. Дифракция СПВ на АПВ:

а) излучение, выходящее из волновода в отсутствие АПВ; б) излучение, выходящее из волновода при взаимодействии СПВ с АПВ.

вые волны H -типа. Эффективные показатели преломления n_m^* [8] для СПВ измерялись с помощью тонкой дифракционной решетки из фоторезиста, нанесенной на поверхность волновода. По измеренным значениям n_m^* ($n_1^*=2,2205$, $n_2^*=2,2087$, $n_3^*=2,2026$) была произведена оценка толщины волновода, которая составила ~2,5—3 мкм, и максимального приращения показателя преломления ($\Delta n \approx 0,02$).

Для возбуждения АПВ на поверхности волноводного слоя фотолитографическим способом были изготовлены двухфазные решеточные преобразователи, основная частота ко-