

Автор выражает благодарность П. Г. Елисееву за полезное обсуждение работы.

1. W. B. Joyce, R. W. Dixon, R. L. Hartman. *Appl. Phys. Letts*, **28**, 684 (1976).
2. M. Ettenberg. *J. Appl. Phys.*, **50**, 1195 (1979).
3. П. Г. Елисеев, А. А. Кочетков. *Квантовая электроника*, **10**, 2118 (1983).
4. S. Tsuji, K. Mizuishi, M. Hirao et al. *Optoelectronics*, № 24, 25 (1985).
5. K. Mizuishi, N. Chinone, H. Sato, R. Ito. *J. Appl. Phys.*, **50**, 6668 (1979).
6. В. П. Дураев, П. Г. Елисеев, Б. И. Махсудов, Б. Н. Свердлов, В. И. Швейкин. *ЖТФ*, **56**, 1570 (1987).
7. П. Г. Елисеев, А. А. Кочетков. *Краткие сообщения по физике*, ФИАН, **6**, 3 (1987).

Поступило в редакцию 5 ноября 1988 г.

A. A. Kochetkov. Degradation of Heterolasers Depending on Pumping Conditions.

A model of degradation of injection heterolasers is considered taking into account initial conditions and the criterion of failure. It is shown that the pumping current and the temperature exert prevailing influence on the ageing rate provided the laser radiation power density is less than 1.0 MW/cm². Expressions for the threshold current as a function of the test time are derived for operation with the constant radiation power and constant pumping.

«Квантовая электроника», 16, № 8 (1989)

УДК 621.373.826.038.823

В. В. Аполлонов, А. А. Сироткин

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ SPER-ЛАЗЕР НА ПЕРЕХОДАХ АТОМОВ Cd

Впервые получен импульсно-периодический режим работы лазера с сегментированным плазменным источником паров металла на переходах атомов CdI ($\lambda=1,43$ и $3,955$ мкм). Средняя мощность излучения лазера при частоте следования импульсов (ЧСИ) накачки 2 кГц составила 36 и 20 мВт соответственно для длин волн $\lambda=1,43$ и $3,955$ мкм. Обсуждаются механизмы, ограничивающие предельную ЧСИ накачки. Даны экспериментальные оценки предельной частоты импульсно-периодического режима работы лазера и показаны пути повышения его выходных энергетических характеристик.

Лазеры с сегментированным возбуждением плазмы и последующей рекомбинацией (SPER-лазеры) представляют собой новый тип электроразрядных лазеров на парах металлов. С их помощью получена генерация на большом числе переходов атомов и ионов в ИК, видимом и УФ диапазонах длин волн (5,46—0,2983 мкм) [1—4]. SPER-лазер прост по конструкции, обладает высоким ресурсом работы, секционированный плазменный источник паров в нем позволяет использовать почти все металлы. Широкое практическое применение SPER-лазер может найти при реализации импульсно-периодического (ИП) режима работы.

В настоящей работе впервые исследуется ИП режим работы SPER-лазера на переходах атомов CdI ($\lambda=1,43$ и $3,955$ мкм). Активный элемент (АЭ) SPER-лазера состоял из 70 Cd электродов размерами $12 \times 2 \times 1$ мм, расположенных на диэлектрической подложке в линию с зазором 1—1,5 мм между ними. Для накачки использовался источник питания с прямоугольными импульсами тока $I_n \sim 50$ —300 А длительностью $\tau_n \sim 4$ мкс, напряжением $V_n \sim 10$ —24 кВ и частотой повторения импульсов до 2 кГц. Резонатор длиной 120 см был образован диэлектрическими зеркалами радиусом 3 м с коэффициентами отражения 0,98 и 0,999 на длине волны $\lambda=1,43$ мкм, а также зеркалом с отверстием \varnothing 2 мм для $\lambda=3,555$ мкм. Ось резонатора располагалась параллельно ряду электродов на расстоянии 4—10 мм от подложки.

На основании ранее проведенных исследований [5—7] нами был предложен следующий механизм формирования активных сред (АС) лазеров с сегментированным плазменным источником паров металла. При включении высоковольтного импульса в начальный момент к концам АЭ приложено полное зарядное напряжение (рис. 1, а). Между крайними электродами в буферном

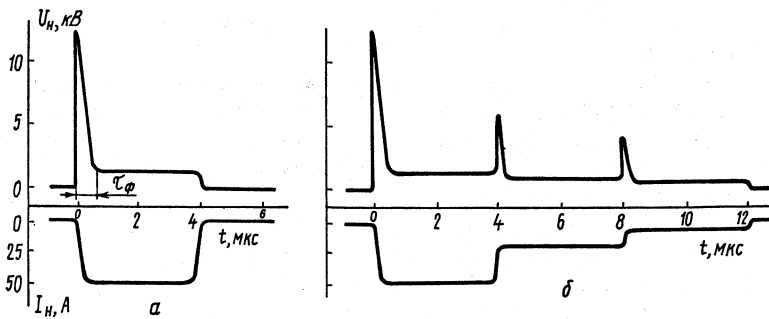


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения U_n и тока I_n накачки для прямоугольного импульса тока (а) и импульса тока с затянутым спадом (б)

газе начинает формироваться тлеющий разряд, а в зазорах между соседними электродами — искровой. Время развития тлеющего и искрового разрядов зависит от давления p и сорта буферного газа, перенапряжения E , зазора между соседними электродами d и их материала. На фронте импульса тока накачки происходят возбуждение буферного газа электронным ударом и накопление долгоживущих ионных и метастабильных состояний. После окончания формирования искрового разряда в зазорах электродами напряжение на концах АЭ резко падает, происходит переключение вклада энергии импульса накачки с буферного газа на плазму паров металла, образующихся в результате эрозии электродов. При разлете плазмы происходит перемешивание паров металлов и буферного газа. Ионы металла образуются при перезарядке ионами He^+ в процессе пеннинговской ионизации, а также в результате электронного удара. Инверсия на переходах атомов CdI формируется при рекомбинации однократных ионов в процессе столкновительного охлаждения на нейтралах буферного газа после окончания импульса тока накачки.

Таким образом, из предложенной схемы формирования АС SPER-лазера следует, что существуют два механизма, которые ограничивают предельную частоту ИП режима работы.

1. При рекомбинационной накачке наложение во времени импульса тока накачки на импульс излучения лазера приводит к срыву генерации [6]. В этом случае предельная частота повторения (при условии максимального КПД) $\nu_1 = 1/(\tau_n + \tau_s + \tau_{из})$, где τ_n — длительность накачки, τ_s — задержка между импульсами тока и генерации, $\tau_{из}$ — длительность импульса излучения.

2. Остаточная ионизация АС SPER-лазера может привести к нарушению распределения энергии импульса тока накачки между возбуждением буферного газа и образованием паров металла. В этом случае предельную частоту ограничивает время восстановления среды $\tau_v; \nu_2 = 1/\tau_v$.

На рис. 2 приведены зависимости лазерного излучения $I_{лаз}$ от тока накачки I_n и давления буферного газа. Импульс генерации длительностью

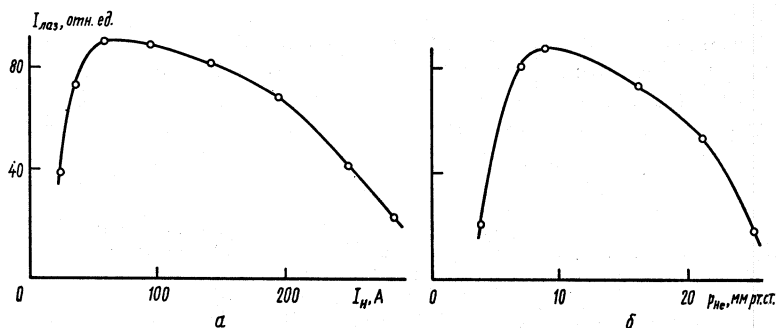


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения SPER-лазера от тока накачки I_n (а) и давления буферного газа (He) (б)

$\tau_n \sim 50$ — 80 мкс наблюдался в послесвечении с задержкой $\tau_3 \sim 20$ — 40 мкс относительно импульса тока.

Эксперименты со сдвоенными импульсами накачки показали, что при давлении буферного газа $p_{\text{He}} > 5$ мм рт. ст. первый импульс тока накачки не оказывал влияния на формирование генерации вторым импульсом накачки, если последний подавался сразу после окончания импульса генерации. Таким образом, в этом случае предельная частота повторения составляла $\nu_1 \sim 10$ кГц ($\tau_n = 4$ мкс, $\tau_3 = 20$ мкс, $\tau_n = 80$ мкс).

При уменьшении давления $p_{\text{He}} < 5$ мм рт. ст. возрастала роль остаточной ионизации АС, время ее восстановления увеличивалось, предельная частота повторения импульсов снижалась до $\nu_2 \sim 1$ кГц. Это, по-видимому, накладывает ограничения на энергетические параметры лазеров на переходах ионов, поскольку для их работы требуются сравнительно низкие давления буферного газа $p_{\text{He}} \sim 2$ — 3 мм рт. ст. [2—4].

Экспериментальное исследование параметров ИП SPER-лазера на переходах атомов CdI показало, что лазер устойчиво работал до частот $\nu = 2$ кГц. При этом ограничения по частоте определялись только техническими возможностями источника накачки. Средняя мощность излучения лазера при $\nu = 2$ кГц составляла ~ 36 мВт на длине волны $\lambda = 1,43$ мкм и была вдвое меньшей для $\lambda = 3,955$ мкм.

Полученные энергетические характеристики лазера не являются предельными. Оптимизация параметров резонатора и условий накачки может существенно повысить выходные параметры ИП SPER-лазера. Кроме того, конструкция АЭ дает возможность значительно увеличить длину АС при сохранении компактности лазера. В [1] указывалось, что, располагая два ряда электродов параллельно друг другу так, чтобы осуществлялся встречный разлет плазмы, или ограничивая боковой разлет плазмы стеклянными стенками, можно существенно повысить интенсивность излучения SPER-лазера.

Представляет также интерес режим накачки с затянутым спадом импульса тока (рис. 1, б). Ступенчатая форма импульса накачки реализуется, например, при работе формирующей линии на рассогласованную нагрузку. Можно использовать импульс тока аperiодической формы. Нами экспериментально показано, что увеличение длительности импульса тока накачки за счет затягивания его спада (рис. 1, б) позволяет в 2—3 раза увеличить энергосъем по сравнению с накачкой импульсом тока прямоугольной формы (рис. 1, а). При затягивании спада импульса тока накачки расширяется область генерации и увеличивается длительность импульса излучения лазера [6]. Расширение области генерации в этом случае происходит, по-видимому, из-за увеличения объема плазмы и пространственного выравнивания ее параметров. Такой режим накачки обеспечивает транспортировку плазмы с необходимыми параметрами без ее перегрева.

Следовательно, при использовании для накачки импульсов тока с затянутым спадом и частотой повторения $\nu \sim 10$ кГц следует ожидать повышения средней мощности излучения ИП SPER-лазера на переходах атомов до 0,5—1 Вт и даже выше.

Таким образом, в настоящей работе впервые получен ИП режим работы SPER-лазера на переходах атомов CdI. Средняя мощность лазера на длине волны $\lambda = 1,43$ мкм составила 36 мВт, а на $\lambda = 3,955$ мкм — 20 мВт при частоте следования импульсов тока накачки 2 кГц. Предложен и реализован режим накачки с затянутым спадом импульса тока.

1. W. T. Silfvast, L. H. Szeto, O. R. Wood II. *Appl. Phys. Letts*, **36**, 615 (1980).
2. W. T. Silfvast, L. H. Szeto, O. R. Wood II. *Appl. Phys. Letts*, **39**, 212 (1981).
3. W. T. Silfvast, O. R. Wood II. *Optics Letts*, **7**, 34 (1982).
4. J. J. Macklin, O. R. Wood II, W. T. Silfvast. *IEEE J. QE-18*, 1832 (1982).
5. В. В. Аполлонов, С. И. Державин, А. М. Прохоров, А. А. Сироткин. *Письма в ЖТФ*, **14**, 983 (1988).
6. В. В. Аполлонов, С. И. Державин, А. А. Сироткин. Тезисы Всес. сов. «Инверсная заселенность и генерация на переходах в атомах и молекулах». — Томск, 1986, с. 31.

V. V. Apollonov, A. A. Sirotkin. A Repetitively Pulsed SPER Laser Due to Transitions in Cd Atoms.

The repetitive-pulse operation of a laser with a segmental plasma source of a metal vapor due to transitions in Cd I atoms ($\lambda=1.43, 3.955 \mu\text{m}$) has been obtained for the first time. The average power of the laser radiation at the pumping pulse repetition rate of 2 kHz amounted to 36 and 20 mW for the wavelengths $\lambda=1.43 \mu\text{m}$ and $\lambda=3.955 \mu\text{m}$ respectively. Mechanisms are discussed which limit the ultimate pumping pulse repetition rate. Experimental estimations of the ultimate rate of the repetitive-pulse laser operation and ways for enhancement of the output laser energy characteristics are given.

«Квантовая электроника», 16, № 8 (1989)

УДК 621.373.826.038.825.2

Г. И. Дьяконов, В. А. Маслов, В. А. Михайлов, С. К. Пак, В. Н. Семененко, И. А. Щербак

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ИСГГ: Cr, Nd-ЛАЗЕР С УДВОЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ КТР

Исследованы генерационные характеристики импульсного ИСГГ: Cr, Nd-лазера с поляризационным выводом излучения из резонатора и преобразованием частоты во вторую гармонику в кристалле КТР. На частоте второй гармоники получен КПД $\sim 1\%$ при средней мощности ~ 6 Вт и энергии моноимпульсов выходного излучения $\sim 0,12$ Дж. В кристалле КТР при накачке излучением с однородным распределением интенсивности по сечению пучка достигнут КПД удвоения частоты $\sim 80\%$.

Прогресс на пути повышения КПД импульсно-периодических твердотельных неодимовых лазеров с преобразованием частоты во вторую гармонику обусловлен созданием новых эффективных кристаллов как для активных элементов (АЭ) лазеров, так и для эффективных преобразователей частоты. На сегодняшний день один из наиболее перспективных материалов для использования в качестве АЭ неодимовых лазеров — кристалл ИСГГ: Cr, Nd. В ИСГГ: Cr, Nd-лазере с поляризационным выводом излучения из резонатора достигнут КПД $\sim 3,6\%$ в сочетании с высокой импульсной и средней мощностью излучения [1]. Особенностью такого лазера является стабильность энергии импульсов выходного излучения в широком диапазоне изменения средней мощности накачки, в том числе при сильном наведенном термодвулучепреломлении в АЭ.

Уникальными свойствами обладает преобразователь частоты излучения неодимовых лазеров во вторую гармонику на кристалле калий-титанил-фосфата КТР [2]. Интерес к этому кристаллу вызван прежде всего высоким КПД преобразования частоты, а также рекордно широкими угловым и температурным синхронизмами.

В настоящей работе ИСГГ: Cr, Nd-лазер с поляризационным выводом излучения из резонатора и удвоением частоты излучения в кристалле КТР исследовался на предмет получения максимального КПД генерации лазера на удвоенной частоте при высоких импульсной и средней мощностях излучения.

В экспериментах использовались кристаллы КТР, выращенные модернизированным методом Чохральского из раствора — расплава на основе $\text{K}_2\text{O} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{TiO}_2$. Этот метод позволяет выращивать рекордные по размеру були кристалла КТР высокого оптического качества с размерами основания 40×50 мм и высотой до 60 мм. Кристаллы вырезались вдоль направления, составляющего углы $\varphi=29^\circ 30'$ относительно оси X и $\theta=90^\circ$ относительно оси Z, что соответствует угловому синхронизму типа oee на длине волны генерации ИСГГ-лазера $\lambda=1058,2$ нм. Расчет направления синхронизма проводился по