

Физическая аппаратура

УДК 621.373

Динамика генерации фазово-сопряженного ИАГ:Nd-лазера с пассивной модуляцией добротности и параллельным соединением резонаторов

С. А. Анисимова, П. Е. Тетерин

Ковровская государственная технологическая академия им. В. А. Дегтярева, г. Ковров, Россия

Предложена система фазово-сопряженного лазера с параллельным соединением петлевых оптически связанных резонаторов и пассивной модуляцией добротности для получения мощного лазерного излучения. Численным моделированием определены особенности динамики генерации лазерной системы, максимальные энергетические параметры и оптимальное число резонаторов.

Возрастающий интерес к лазерам на голографических решетках в активных средах обусловлен возможностью управления в широких пределах энергетическими, временными и пространственными параметрами излучения. Особенно перспективными представляются лазеры на объемных решетках усиления, образованных пространственным выгоранием инверсии в активной среде, поскольку самокомпенсация фазовых искажений при четырехволновом взаимодействии делает возможной генерацию высокоомощных лазеров на ТЕМ₀₀-моду. Системы с многозеркальными последовательно соединенными лазерными модулями [1] позволяют получать мощное одномодовое излучение, однако снижение ресурса работы активных элементов (АЭ) при значительной мощности излучения в резонаторе и невозможность компенсации термолинз приводят к снижению КПД лазера. Для устранения этих недостатков разработана оптическая схема лазерных модулей с параллельным соединением [2]. Пассивный лазерный затвор (ПЛЗ) располагается в центральном канале вблизи глухого зеркала, и с его помощью осуществляют пассивную модуляцию добротности и синхронизацию излучения лазерных модулей. В ПЛЗ встречные волны записывают дифракционную голографическую решетку усиления [3], которая фазирует проходящее через эту решетку излучение всех модулей. Недостатком лазерного устройства является стирание голографических решеток усиления при значительной мощности излучения в центральном канале.

В настоящей работе предложена схема фазово-сопряженного лазера с ПЛЗ, расположенным в каждом лазерном модуле. Фазовое сопряжение осуществляется петлевыми резонаторами, соединяю-

щими попарно ПЛЗ в соседних лазерных модулях. Предложенная схема позволяет осуществлять режим пассивной модуляции добротности, обеспечивая синхронизацию излучения и его фазовое сопряжение при большом числе лазерных модулей. Предварительно исследуются несколько других конфигураций фазово-сопряженных лазеров с параллельным соединением лазерных модулей в целях нахождения оптимальной схемы.

Схемы параллельного соединения резонаторов с пассивной модуляцией добротности и обращением волнового фронта показаны на рис. 1. Первый лазерный модуль формируется сферическими зеркалами 8 и 12 ($R = 100\%$) и активным элементом 1. Второй лазерный модуль формируется сферическими зеркалами 9 и 13 ($R = 100\%$) и активным элементом 2. Третий лазерный модуль формируется сферическими зеркалами 10 и 14 ($R = 100\%$) и активным элементом 3. Излучение из каждого лазерного модуля выводится в общий канал посредством светоделительных пластинок 5—7. ПЛЗ на кристалл LiF:F_2^- (4), расположенный в основном канале, создает условия синхронной генерации и фазового сопряжения излучения всех лазерных модулей. В ПЛЗ встречные волны записывают объемные решетки усиления. Оптическая связь между лазерными модулями осуществляется посредством снятия инверсной населенности в одном активном элементе излучением, проходящим через общий канал из других лазерных модулей. Пассивная модуляция добротности кристаллами LiF:F_2^- (15—17), расположенными в каждом лазерном модуле (см. рис. 1, б), приводит к появлению еще более мощных гигантских импульсов, чем на рис. 1, а.

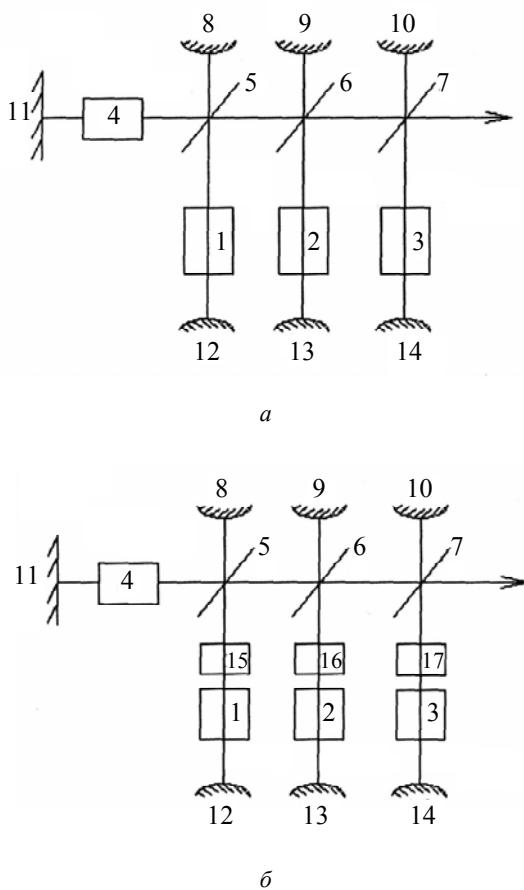


Рис. 1. Фазово-сопряженный ИАГ:Nd-лазер с пассивной модуляцией добротности и с параллельным соединением резонаторов:

a — с ПЛЗ только в общем канале; *б* — с ПЛЗ в общем канале и в лазерных модулях; 1—3 — активные элементы; 4 — пассивный лазерный затвор; 5—7 — светоделительные пластинки, выводящие излучение каждого лазера в общий канал; 8—14 — зеркала, образующие сложный оптический резонатор; 15—17 — пассивные лазерные затворы в парциальных резонаторах

Селекция мод в нестабильных оптически связанных резонаторах с пассивной модуляцией добротности позволяет получать одномодовый одночастотный режим генерации гигантских импульсов [4]. В данной работе рассматривается одномерная задача взаимодействия поля излучения с активной средой и распространения излучения в свободном пространстве. Предполагается, что электромагнитная волна является плоской, линейно поляризованной. Поскольку для ИАГ:Nd время продольной релаксации $T_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ с, время поперечной релаксации $T_2 = 1,6 \cdot 10^{-11}$ с, а длительность импульсов генерации составляет $\tau_i = 150$ —400 нс, то выполняется условие $T_1 \gg \tau_i \gg T_2$. Это позволяет оценить изменение интенсивности I потока излучения (число фотонов, проходящих через единичную площадку в единицу времени) и плотности N инверсной населенности в активной среде вдоль оси z в прямом (знак “+”) и обратном

(знак “-”) направлениях с помощью уравнений баланса в частных производных:

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial t} \pm v \frac{\partial I_{ij}}{\partial z} = v I_{ij} (\sigma N_i - \eta);$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\beta \sigma N_i \sum I_{ij} + \frac{N_{0i}}{T_1} - \frac{N_i}{T_1},$$

где $i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4$;

v — скорость распространения излучения;

σ — сечение вынужденного перехода;

η — коэффициент пассивных (вредных) потерь;

β — целое число, описывающее изменение разности населенности рабочих уровней при излучении одного фотона (для ИАГ:Nd $\beta = 1$, для LiF:F₂⁻ $\beta = 2$);

N_{0i} — равновесная плотность инверсии населенности.

Распространение излучения в свободном пространстве до АЭ и после него в отсутствие потерь описывается уравнением

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial t} \pm v \frac{\partial I_{ij}}{\partial z} = 0.$$

Уравнения для связанных волн при четырехволновом смешении в фазово-сопряженной активной среде можно представить в виде [5]

$$\frac{d|A_1|}{dz} = g_0^{\tau,p} |A_1| - \varepsilon g_1^{\tau,p} |A_{3,4}|;$$

$$\frac{d|A_2|}{dz} = -g_0^{\tau,p} |A_2| - \varepsilon g_1^{\tau,p} |A_{4,3}|;$$

$$\frac{d|A_3|}{dz} = g_0^{\tau,p} |A_3| - \varepsilon g_1^{\tau,p} |A_{1,2}|;$$

$$\frac{d|A_4|}{dz} = -g_0^{\tau,p} |A_4| - \varepsilon g_1^{\tau,p} |A_{2,1}|,$$

где $|A_k| = \sqrt{I_k}$ — комплексные амплитуды световых пучков;

τ и ρ соответствуют случаю пропускающей ($\varepsilon = 1$) и отражательной ($\varepsilon = -1$) решетки;

$g_0^{\tau,p} = \frac{N(t)\sigma}{2}$; $g_1^{\tau,p} = \frac{\Delta N(t)\sigma}{2}$ — нелинейные коэффициенты;

$\Delta N = N_{\max} - N_{\min}$ — разность инверсных населенностей в узлах и пучностях при интерференции взаимодействующих волн в пассивном лазерном затворе.

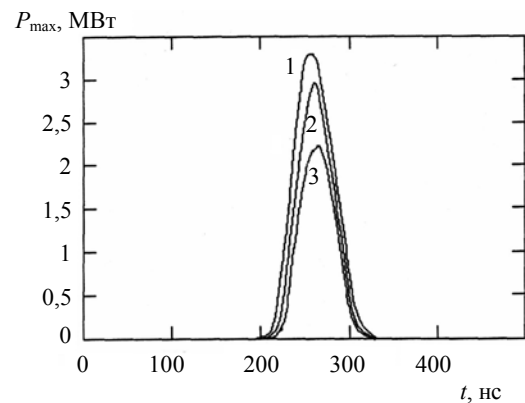
Схема, представленная на рис. 1, а, была предложена ранее [2, 3], но численный анализ динамики генерации для нее не проводился. Излучение из каждого активного элемента (см. рис. 1, а) частично выводится в общий канал с помощью светоделительных пластинок (5—7) с коэффициентом отражения $\rho = 0,5$, а частично попадает в ПЛЗ, расположенный в общем канале, отражается от зеркала 11 и возвращается обратно в активный элемент. Таким образом, зеркала 8, 11, 12 формируют резонатор первого модуля, зеркала 9, 11, 13 — резонатор второго модуля, 10, 11, 14 — резонатор третьего модуля.

Периодическое самопросветление кристалла LiF:F_2^- наиболее вероятно при синхронной генерации всех лазерных модулей благодаря положительной обратной связи между ними. Поэтому кристалл LiF:F_2^- можно рассматривать как задающий генератор, осуществляющий фазовое сопряжение излучения лазерных модулей, входящих в лазерную систему. Периодическое самопросветление ПЛЗ сопровождается образованием в нем отражательной динамической голографической решетки, которая обеспечивает фазовое сопряжение излучения. Недостатком этой схемы является невозможность достижения большой мощности выходного излучения, поскольку ПЛЗ находится в общем канале. Для устранения этого недостатка нами предложена схема (см. рис. 1, б), в которой ПЛЗ располагался дополнительно в каждом лазерном модуле.

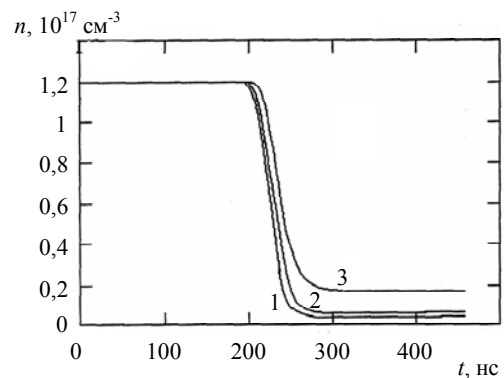
Сравнительный анализ работы двух схем с тремя лазерными модулями был проведен для ненасыщенного коэффициента усиления активного элемента $k = 30$ и начального пропускания ПЛЗ $T_0 = 70\%$. Он показал, что постановка ПЛЗ в каждом резонаторе увеличивает пиковую мощность выходного излучения на порядок с $9 \cdot 10^6$ до $8,7 \cdot 10^7$ Вт. Результаты численного моделирования динамики генерации в схеме, приведенной на рис. 1, б даны на рис. 2.

Динамика генерации второго и третьего модулей значительно зависит от развития гигантского импульса первого лазерного модуля. В каждом резонаторе развивается гигантский импульс (см. рис. 2 — 1, 2, 3) с уровня спонтанного распада 10^{-12} Вт. Длина каждого следующего резонатора больше предыдущего на величину, равную расстоянию между модулями (≈ 40 см). Первый резонатор короче остальных, поэтому мощный импульс развивается в нем раньше, чем в остальных. Гигантский импульс из первого резонатора достигает по основному каналу второй резонатор, частично попадает в него и приводит к просветлению ПЛЗ во втором резонаторе. Это приводит к излучению импульса из второго резонатора меньшей

мощности по сравнению с излучением первого резонатора.



а



б

Рис. 2. Временная зависимость выходной мощности (а) и инверсной населенности (б) в первом (1), втором (2) и третьем (3) лазерных модулях

Инверсная населенность уменьшается в первом активном элементе (см. рис. 2, б, 1) от $1,2 \cdot 10^{17}$ до $5 \cdot 10^{15}$ см^{-3} , во втором активном элементе (см. рис. 1, б, 2) — от $1,2 \cdot 10^{17}$ до $7 \cdot 10^{15}$ см^{-3} , в третьем активном элементе (см. рис. 1, б, 3) — от $1,2 \cdot 10^{17}$ до $20 \cdot 10^{15}$ см^{-3} . Как показали расчеты, инверсная населенность во втором АЭ падает на 3 % меньше, чем в первом активном элементе (см. рис. 2, б — кривые 1 и 2). Это приводит к тому, что мощность гигантского импульса первого лазерного модуля больше, чем мощность гигантского импульса второго лазерного модуля на 17 % (см. рис. 2 — кривые 1 и 2).

Затем гигантские импульсы из первого и второго резонаторов доходят до третьего резонатора, частично просветляют ПЛЗ в третьем резонаторе и вызывают сброс инверсной населенности на 15 % меньше, чем в первом активном элементе. Это приводит к формированию в третьем резонаторе гигантского импульса с пиковой мощностью на 40 % (см. рис. 2, а — кривые 1 и 3). Следовательно, система работает синхронно, и выходной импульс имеет гладкую форму с пиковой мощностью $8,7 \cdot 10^7$ Вт.

Таким образом, каждый добавочный модуль работает все более неэффективно, и оптическая нагрузка на активные элементы и ПЛЗ в лазерных модулях распределяется неравномерно. Проводился численный анализ генерации для разных начальных пропусаний ПЛЗ в целях определения условий равномерного распределения оптической нагрузки на ПЛЗ в каждом модуле. Найдены оптимальные значения начальных пропусаний ПЛЗ в первом резонаторе — $T_{01} = 70\%$, во втором — $T_{02} = 40\%$, в третьем — $T_{03} = 10\%$. В этом случае пиковые мощности гигантских импульсов становятся одинаковыми, равными пиковой мощности гигантского импульса в первом резонаторе, и выходная мощность излучения возрастает в 1,2 раза по сравнению со случаем одинаковых $T_0 = 70\%$ в каждом резонаторе.

Более трех лазерных модулей в схеме на рис. 1, б использовать неэффективно, так как интенсивность излучения в общем канале достигает насыщения и стирает решетки в ПЛЗ (см. рис. 1, поз. 4), прекращая фазовое сопряжение излучения лазерных модулей. Это приводит к уменьшению суммарного выходного излучения в N раз, где N — число модулей. Для увеличения мощности выходного излучения необходимо увеличивать число параллельно соединенных резонаторов. Предложено убрать ПЛЗ из общего канала и использовать для фазового сопряжения петлевые схемы, соединяющие попарно активные элементы или пассивные лазерные затворы в каждом модуле. Это

должно привести к более равномерному распределению оптической нагрузки в каждом модуле и синхронизации излучения большого числа модулей.

Численное моделирование показало, что если петлевые схемы соединяют попарно активные элементы в лазерных модулях (рис. 3), то в активных элементах записываются решетки пропускания, эффективность которых на порядок выше, чем у решеток отражения. Генерация развивается в петлевых схемах, где мощность излучения достигает $\sim 10^5$ Вт, в то время как в лазерных модулях ПЛЗ создает большие потери, и генерация там сохраняется на уровне спонтанного распада $\sim 10^{-12}$ Вт. Выходное излучение является суммой импульсов из лазерных модулей и тоже сохраняется на уровне спонтанного распада. Таким образом, лазерная система с петлевыми схемами, объединяющими активные элементы (см. рис. 3, а), неэффективна.

В следующей из предложенных схем петлевые резонаторы соединяют попарно ПЛЗ (см. рис. 3, б). Численное моделирование показало, что генерация развивается в лазерных модулях в условиях больших потерь, обусловленных наличием ПЛЗ. Спонтанное излучение малой интенсивности в каждом резонаторе записывает большое число объемных решеток в ПЛЗ1, ПЛЗ2 и ПЛЗ3 (рис. 4). Решетки пропускания в ПЛЗ1 записываются пучками интенсивностью I_1^1 и I_2^1 , I_3^1 и I_4^1 , в ПЛЗ2 — пучками интенсивностью I_1^2 и I_2^2 , I_1^2 и I_3^2 , I_4^2 и I_5^2 , I_4^2 и I_6^2 , в ПЛЗ3 — пучками интенсивностью I_1^3 и I_2^3 , I_3^3 и I_4^3 (см. рис. 4).

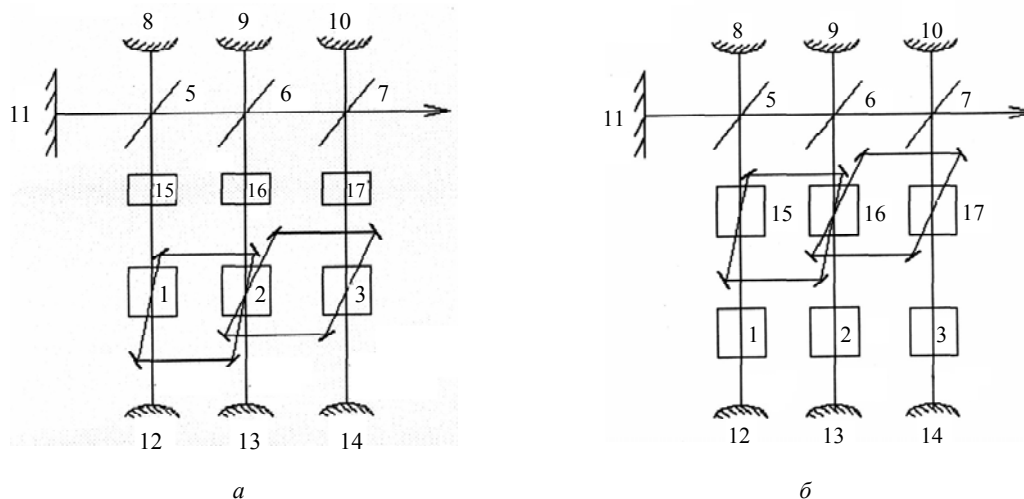


Рис. 3. Фазово-сопряженный ИАГ:Nd-лазер с пассивной модуляцией добротности и параллельным соединением петлевых резонаторов:

а — с петлевыми резонаторами в активных элементах; *б* — с петлевыми резонаторами в ПЛЗ; 1—3 — активные элементы; 5—7 — светоделительные пластинки, выводящие излучение каждого лазера в общий канал; 8—14 — зеркала, образующие сложный оптический резонатор; 15—17 — пассивные лазерные затворы в парциальных резонаторах

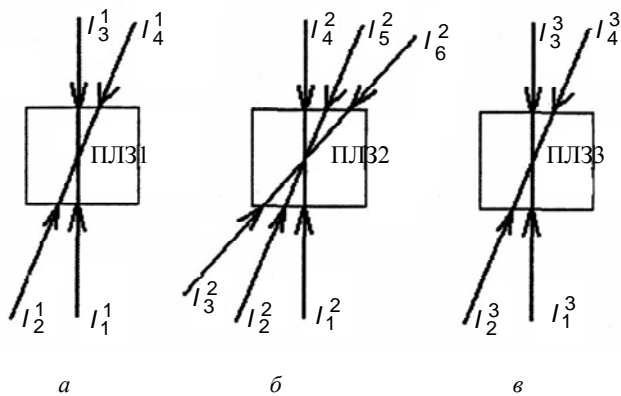


Рис. 4. Часть схемы с петлевыми резонаторами в ПЛЗ: а — решетки в ПЛЗ1 записываются пучками интенсивностью $I_1^1, I_2^1, I_3^1, I_4^1$; б — в ПЛЗ2 — пучками интенсивностью $I_1^2, I_2^2, I_3^2, I_4^2, I_5^2, I_6^2$; в — в ПЛЗ3 — пучками интенсивностью $I_1^3, I_2^3, I_3^3, I_4^3$

Коэффициенты отражения всех этих решеток практически равны друг другу, меняются синхронно, увеличиваясь с ростом мощности излучения в резонаторах. В начальный момент развития гигантского импульса от уровня спонтанного распада 10^{-8} Вт коэффициенты отражения решеток равны $\sim 10^{-6}$. Через петлевые схемы проходит излучение малой мощности, что не дает возможности для развития генерации в петлевых схемах и не позволяет влиять излучению соседнего лазерного модуля на просветление ПЛЗ. Генерация развивается в лазерных модулях в условиях больших потерь из-за наличия ПЛЗ, что позволяет накопить большую инверсную населенность $1,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в активных элементах (см. рис. 3, б, поз. 1, 2, 3). В момент прохождения гигантского импульса через ПЛЗ коэффициенты отражения решеток пропускания достигают максимального значения $\sim 10^{-2}$. Это обеспечивает переход части излучения из первого резонатора во второй, из второго — в первый, из второго — в третий и из третьего — во второй. Таким образом, частично выравнивается оптическая нагрузка на ПЛЗ. Суммарная мощность излучения при этом составляет $8,7 \cdot 10^7$ Вт. Решетки в ПЛЗ также приводят к фазовому сопряжению гигантских импульсов. Численное моделирование показало преимущество предложенной схемы (см. рис. 3, б) перед исследованными ранее (см. рис. 1, а и б). Предложенная схема обеспечивает фазовое сопряжение излучения каждого резонатора и небольшую оптическую нагрузку на ПЛЗ в каждом резонаторе, что позволяет использовать явно большее число параллельно соединенных резонаторов, чем в предыдущих схемах.

Таким образом, численно исследована динамика генерации фазово-сопряженного ИАГ:Nd-лазера с пассивной модуляцией добротности и параллельным соединением трех резонаторов. В общем канале размещается ПЛЗ для создания режима генерации гигантских импульсов и их фазового сопряжения. Показано, что дополнительное размещение ПЛЗ в каждом лазерном модуле увеличивает пиковую мощность выходного излучения на порядок — с $9 \cdot 10^6$ до $8,7 \cdot 10^7$ Вт. Лазерные модули работают синхронно и высвечивают один выходной импульс гладкой формы. Найдены оптимальные значения начальных пропусканий ПЛЗ в первом резонаторе — $T_{01} = 70\%$, во втором резонаторе — $T_{02} = 40\%$, в третьем резонаторе — $T_{03} = 10\%$. В этом случае выходная мощность излучения возрастает в 1,5 раза по сравнению со случаем одинаковых $T_0 = 70\%$ в каждом резонаторе. Обнаружено, что использование более трех лазерных модулей неэффективно. Интенсивность излучения в общем канале достигает насыщения и стирает решетки в пассивном лазерном затворе в основном канале, прекращая фазовое сопряжение излучения лазерных модулей. Это приводит к уменьшению суммарного выходного излучения.

Для увеличения мощности выходного излучения предлагается убрать ПЛЗ из общего канала и использовать для фазового сопряжения петлевые схемы, связывающие ПЛЗ в каждом лазерном модуле. Решетки пропускания с коэффициентом отражения $\sim 10^{-2}$ обеспечивают фазовое сопряжение излучения каждого лазерного модуля и небольшую оптическую нагрузку на ПЛЗ, что позволяет достигать мощности выходного излучения $\sim 10^8$ Вт.

Л и т е р а т у р а

1. Басиев Т. Т., Федин А. В., Кялбиева С. А., Большаков М. В. Динамика генерации ИАГ:Nd-лазера со связанными резонаторами в режиме пассивной модуляции добротности // Известия АН. 1999. Т. 9. № 10. С. 1914—1919.
2. Кравец А. Н. Технологические Nd-лазеры с пассивной модуляцией добротности. — Ковров: Ковров. технол. ин-т., 1993. С. 142.
3. Басиев Т. Т., Федин А. В., Гаврилов А. В., Сметанин С. Н., Кялбиева С. А. Одномодовый ИАГ:Nd-лазер с самонакачивающимся фазово-сопряженным петлевым резонатором // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 2. С. 145—148.
4. Ханин Я. И. Динамика квантовых генераторов. — М.: Сов. радио, 1975.
5. Damzen M. J., Green R. P. M., Syed R. S. Self-adaptive solid-state laser oscillator formed by dynamic gain-grating holograms // Optics Letters. 1995. V. 20. № 16. P. 1704—1706.

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2007 г.

Generation dynamics of a phase-conjugated Nd:YAG-laser with passive Q-switching and parallel configuration cavities

S. A. Anisimova, P. E. Teterin

Kovrov State Technological Academy, Kovrov, Russia

The system of phase — conjugated laser with the parallel configuration of optically coupled loop cavities and passive Q-switch for reception of powerful laser radiation is offered. The numerical modeling allows defining features of generation dynamics in the laser system. The maximum energy output parameters and optimal number of cavities are defined.

УДК 537.533.3:681.7.015.2

Унифицированная система обработки сигналов многоэлементного фотоприемного устройства ИК-диапазона на основе микросхемы программируемой логики типа FPGA

И. И. Кремис, Ю. Ф. Однолько

Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены пути построения унифицированной системы обработки сигналов многоэлементного фотоприемного устройства ИК-диапазона, возможности модульного построения системы обработки сигналов, приведены ее структура и реализация. Описан разработанный унифицированный электронный модуль для тепловизионных приборов на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) типа FPGA. Модуль имеет размеры 115×70×15 мм и потребляет мощность 4 Вт. Приводятся функциональная схема разработанного модуля и результаты использования унифицированного модуля совместно с охлаждаемым ИК-приемником на основе HgCdTe 320×256 и неохлаждаемым микроболометрическим ИК-приемником на основе резистивного аморфного кремния 320×240.

Построение электронных систем обработки сигналов является достаточно трудоемкой задачей. При всем многообразии типов фотоприемников для получения тепловизионного изображения на экране телевизионного монитора требуется применение однотипных операций по приему, выводу и обработке сигналов [1—10]. Ограничение на применение того или иного приемника обуславливается наличием в системе ресурсов, необходимых для обработки поступающего с приемника сигнала. Следовательно, возникает вопрос возможности создания электронной системы обработки сигнала, способной работать с некоторым набором ИК-приемников, не требуя при этом конструктивных или схемотехнических изменений. Создание узкоспециальной электронной системы для каждого типа приемника может быть оправдано лишь для приборов с минимальными массогабаритными характеристиками и потребляемой мощностью.

Цель настоящей статьи — обозначить некоторые пути решения вопросов создания унифицированной системы обработки сигналов многоэлементных ИК-приемников, в основу построения которой положен модульный принцип [10], где система конструктивно разбивается на модули, каждый из которых выполняет определенные функции. При этом применение унифицированной системы благодаря возможности изменения конструктивных и функциональных параметров модулей позволит легко модифицировать прибор, построенный на его основе.

Ввиду того что структурная схема электронного тракта тепловизионных приборов, отличаясь друг от друга в каждом конкретном случае, имеет общий принцип построения схемы выделения и обработки сигнала, появляется возможность разбить ее на отдельные модули. В данной работе предлагается построение системы по аппаратно-