

- [5] Call ear A.B., Du K. // Chem. Phys. Lett. 1986. V. 128. N 2. P. 141-144.
- [6] Call ear A.B., Du K. // Chem. Phys. 1987. V. 113. N 1. P. 73-86.
- [7] Девдариани А.З., Загребин А.Л. // Хим. физика. 1986. Т. 5. № 2. С. 147-155.
- [8] Девдариани А.З., Загребин А.Л. // Опт. и спектр. 1985. Т. 58. В. 6. С. 1223-1227.
- [9] Z u s h a j E., S t o l l H., P r e u s s H. // J. Phys. 1987. V. B20. N 7. P. 1487-1507.
- [10] Загребин А.Л., Павловская Н.А. // Хим. физика. 1988. Т. 7. № 4. С. 435-445.
- [11] Смирнов Б.М. Возбужденные атомы. М.: Энергоиздат, 1982. 232 с.
- [12] Девдариани А.З., Загребин А.Л. // Хим. физика. 1982. Т. 1. № 7. С. 947-956.

Поступило в Редакцию  
4 октября 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 24

26 декабря 1989 г.

06.3

СИСТЕМА ДИОДНОЙ НАКАЧКИ АИГ- $Nd^{3+}$   
НА ОСНОВЕ  $InGaAsP / GaAs$  СТРУКТУР  
( $P_{1.06} = 320$  мВт, КПД 12 %)

Д.З. Гарбузов, А.Б. Гулаков,  
А.В. Кочергин, Н.А. Стругов,  
В.П. Чалый

Инжекционные источники излучения с  $\lambda = 0.808$  мкм на основе  $AlGaAs / GaAs$  гетероструктур используются для накачки твердотельных АИГ- $Nd^{3+}$  лазеров уже более 15 лет [1, 2]. Современный уровень разработок  $AlGaAs / GaAs$  лазеров, предназначенных для накачки АИГ- $Nd^{3+}$  активных элементов, может быть охарактеризован следующими максимальными параметрами, достигнутыми при использовании лазеров с одиночной излучающей областью шириной порядка 100 мкм: предельная мощность непрерывного излучения ( $\lambda = 1.06$  мкм) порядка 350 мВт при полном КПД преобразования электрической мощности в световую 9.1 % [3] и 11 % [4].

Альтернативной по отношению к системе  $AlGaAs / GaAs$  является система  $InGaAsP / GaAs$ , в которой так же могут быть созданы высокоэффективные лазеры с длиной волны излучения  $\lambda = 0.808$  мкм, обеспечивающей эффективную накачку АИГ- $Nd^{3+}$  лазеров.

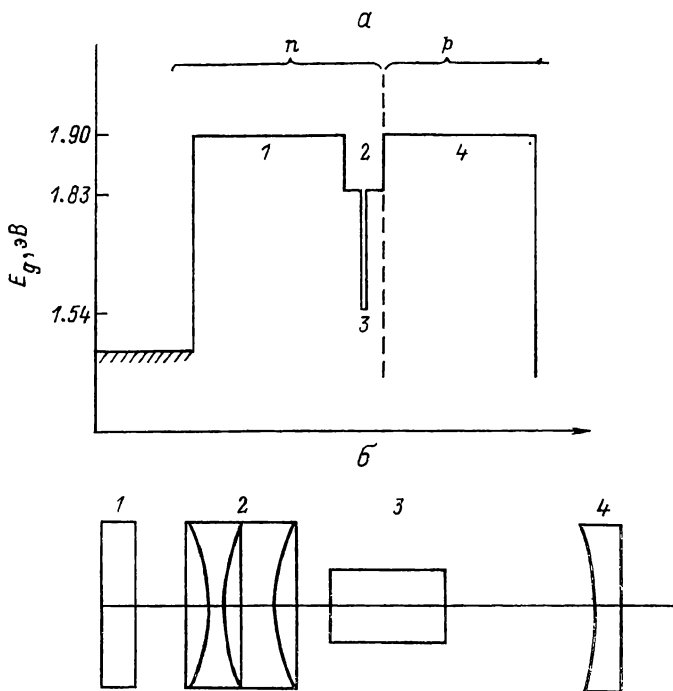


Рис. 1. А. Схематическое изображение  $InGaAsP/GaAs$  лазерной структуры; размеры и состав слоев: 1 - 2 мкм  $In_{0.49}Ga_{0.51}P[Te]$ , 2 - 0.5 мкм  $In_{0.43}Ga_{0.57}As_{0.15}P_{0.25}$ , 3 - 200 Å  $In_{0.13}Ga_{0.87}As_{0.75}P_{0.25}$ , 4 - 0.5 мкм  $In_{0.49}Ga_{0.51}P[Zn]$ . Б. Схема твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой: 1 - полупроводниковый лазер, 2 - фокусирующий объектив, 3 - активный элемент АИГ- $Nd^{3+}$ , 4 - выходное зеркало.

Работы по созданию  $InGaAsP/GaAs$  лазеров на основе квантоворазмерных структур раздельного ограничения, полученных методом жидкофазной эпитаксии, были начаты нами около 5 лет назад [5-8]; как показывают результаты настоящей работы, достигнутые при их использовании, параметры систем накачки АИГ- $Nd^{3+}$  не уступают упомянутым лучшим результатам для  $AlGaAs/GaAs$  систем накачки.

Лазерные  $InGaAsP/GaAs$  гетероструктуры, как и в предыдущих работах [5-8], изготавливались модифицированным методом жидкостной эпитаксии [4], обеспечивающим получение тонких (100-200 Å) активных областей этих структур при осаждении соответствующих составов твердых растворов  $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$  на движущуюся подложку. Схематически  $InGaAsP/GaAs$  лазерная структура изображена на рис. 1, а. Более детальное описание режимов получения и параметров структур содержится в [6, 8]. Не останавливаясь здесь на этих вопросах, подчеркнем лишь два принципиальных, по нашему мнению, факта.

1. Волноводная и активная области данных структур преднамеренно не легируются ( $N_g < 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), что обеспечивает возможность получения дифференциальной эффективности, превышающей 80 % в лазерных диодах с резонаторами длиной до 2 мкм. Именно в таких диодах было получено рекордное КПД преобразования электрической мощности в световую – 66% при температуре 10 °С [8].

2. На первом этапе данных исследований лазерные структуры выращивались на  $GaAs$  подложках с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  [5-7]. Первые результаты, полученные с использованием подложек  $\langle 100 \rangle$ , опубликованы в [8]. Переход к ориентации  $\langle 100 \rangle$  накладывает ряд дополнительных требований на режимы выращивания структур, но значительно облегчает процедуру разделения структуры на отдельные диоды после фотолитографических процессов.

Рассматриваемые в данной работе полосковые лазеры с шириной полоска в 100 мкм были изготовлены простейшим методом с использованием в качестве изолятора слоя  $SiO_2$ . Лазерные диоды напаялись с помощью  $In$ -припоя на медные теплоотводы вниз слоями структуры. Заданная температура теплоотводов поддерживалась в процессе экспериментов с помощью термохолодильника.

Накачка активного АИГ- $Nd^{3+}$  элемента осуществлялась в простейшем варианте продольной схемы (рис. 1, б). Длина АИГ-элемента составляла 1 см, селективное зеркало на его выходном торце обеспечивало коэффициент отражения при  $\lambda = 1,06$  мкм не менее 99.5 % и не более 10 % для излучения накачки. Заднее сферическое зеркало ( $R = 150$  мм) с коэффициентом пропускания 2 % обеспечивает радиус каустики для  $TEM_{00}$  моды порядка 150 мкм.

Мощностные характеристики одного из лазерных диодов (диода № 18-А589), использованных в экспериментах по накачке, приведены на рис. 2, а. По оси ординат отложены ток и подводимая к диоду электрическая мощность. На одну из граней лазерного диода было нанесено шестислойное диэлектрическое зеркало из чередующихся слоев  $Si - SiO_2$ . Выбор данного диода для экспериментов по накачке обусловлен тем, что по КПД и мощности непрерывного излучения он ненамного уступал лучшим из изготовленных нами образцов. Положение максимума огибающей полосы излучения лазерного диода в режиме максимальной мощности излучения ( $J = 1.4$  А) совпадало с максимумом поглощения АИГ- $Nd^{3+}$  при +6 °С. Ширина огибающей спектра возбуждающего излучения по уровню 0.1 при этом составляла около 2.5 нм. Согласование спектров возбуждающего излучения и поглощения АИГ- $Nd^{3+}$ , по нашим оценкам, обеспечивает усредненный эффективный коэффициент поглощения  $\approx 4 \text{ см}^{-1}$ . Дифференциальная эффективность лазерного диода при +15 и +6 °С составляла 83 и 89 %, а КПД 47 % и 50 % соответственно. Мощность излучения накачки при  $T = 6$  °С и  $I = 1.4$  А равнялась 1.4 Вт. Диаграммы направленности возбужденного излучения при всех мощностях имели однолепестковый характер с типичными значениями полуширины менее  $\theta_1 = 4^\circ$  и  $\theta_{11} = 6^\circ$ . Это обеспечивало возможность фокусировки используемым объективом с числовой апертурой 0.6 более 85 % излучения в пятно диаметром 300 мкм, близкое к размерам каустики моды резонатора АИГ- $Nd^{3+}$  лазера.

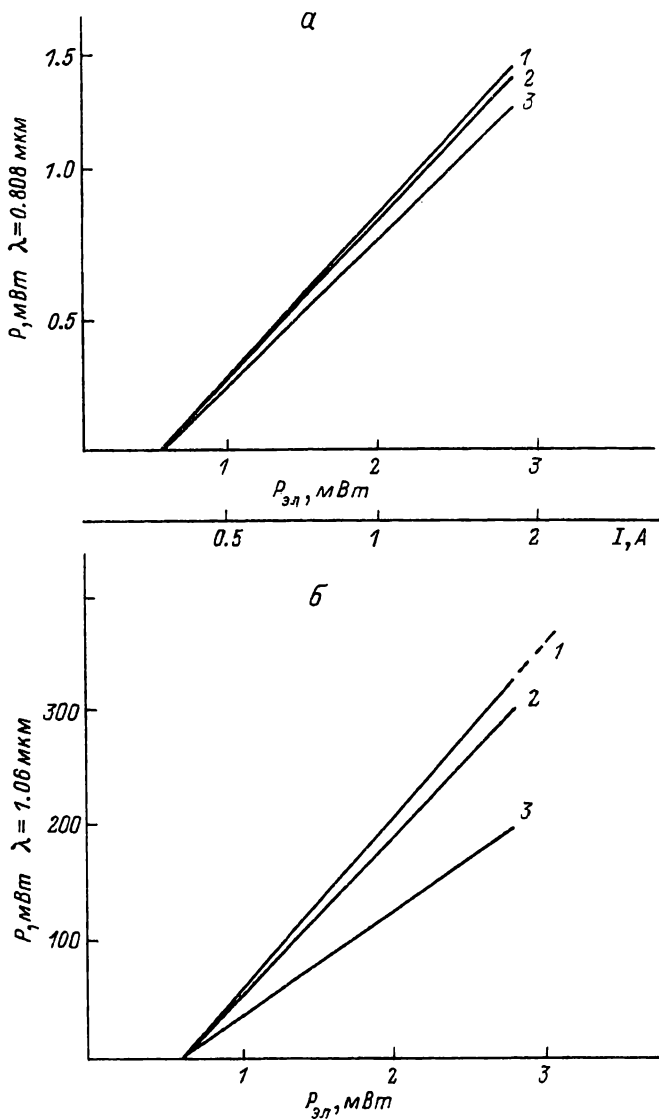


Рис. 2. А. Зависимость мощности излучения лазерного диода 18-А589 от потребляемой электрической мощности при различных температурах: 1 - +6 °С, 2 - +9 °С, 3 - +14 °С. Б. Зависимость мощности твердотельного лазера от электрической мощности потребляемой полупроводниковым лазером 18-А589-при различных температурах.

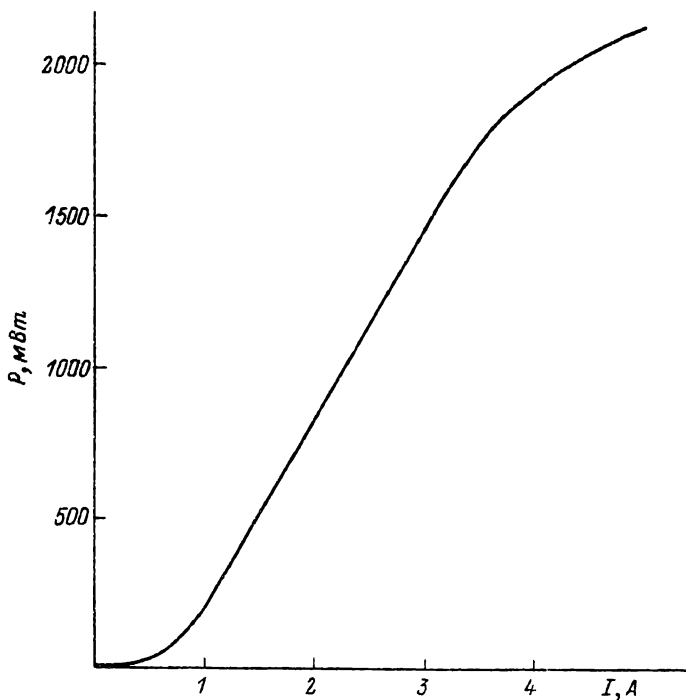


Рис. 3. Зависимость излучаемой оптической мощности лазерного диода 4-A512 от тока при  $T=+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2, б приведены зависимости мощности излучения, генерированного АИГ- $\text{Nd}^{3+}$  лазером от электрической мощности, подведенной к лазерному диоду. При токе накачки диода 1.4 А максимальная мощность излучения с  $\lambda = 1.06\text{ мкм}$  составила 320 мВт при температуре  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , полный КПД системы при этом равнялся 12%. Оптическая дифференциальная эффективность систем накачки (равная отношению числа фотонов с  $\lambda = 1.06\text{ мкм}$  к числу возбуждающих фотонов) равнялась 30%, что в 1.5 раза меньше литературных данных для аналогичных вариантов систем накачки [3, 4]. Сравнение рис. 2, а и б показывает, что при повышении температуры основной причиной уменьшения эффективности и КПД рассматриваемой системы является рассогласование спектра поглощения АИГ- $\text{Nd}^{3+}$  элемента и спектра возбуждающего излучения.

В описанных экспериментах по накачке непрерывная мощность  $\text{InGaAsP} / \text{GaAs}$  лазера не была доведена до порога необратимых изменений. Измерения в квазинепрерывном режиме, проведенные с токовыми импульсами длительностью 1 мс (штриховая кривая на рис. 2, б), а также эксперименты с другими  $\text{InGaAsP} / \text{GaAs}$

лазерными диодами показывают, что нет принципиальных ограничений, которые препятствовали бы достижению мощности излучения 2 Вт в непрерывном режиме генерации для лазеров со 100 мкм полоском. Подтверждением этого может служить ватт-амперная характеристика лазера 4-А 512, приведенная на рис. 3. Этот лазер не имел дополнительных покрытий на сколах резонатора, тем не менее излучал в непрерывном режиме мощность  $\approx 2.1$  Вт с каждого зеркала при токе 3 А.

Таким образом, в данном сообщении описаны результаты использования для накачки АИГ- $Nd^{3+}$  лазеров нового типа лазерных диодов на основе гетероструктур  $InGaAsP / GaAs$  и продемонстрировано, что эти диоды позволяют получить параметры системы (КПД = 12%,  $P=320$  мВт), близкие к достигнутым для традиционных  $AlGaAs/GaAs$  систем накачки [1, 2]. Также показано, что мощность непрерывного излучения  $InGaAsP / GaAs$  лазера со 100 мкм полоском может быть увеличена еще в 1.5 раза и доведена до 2 Вт, что должно привести к возрастанию мощности излучения 1.06 мкм еще в 1.5 раза по сравнению с приведенными выше значениями. Еще одним резервом повышения выходной мощности АИГ- $Nd^{3+}$  лазера является совершенствование оптических элементов системы.

В заключение авторы благодарят В.И. Устюгова, М.М. Халева, Г.Е. Новикова за полезные обсуждения и Н.Ю. Антонишкис, Т.А. Налёт, А.П. Шкурко за помощь в приготовлении образцов и проведении различных измерений.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Ларионов В.П., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Тучкевич В.М., Румянцев В.Д., Халеев М.М. // ЖТФ. 1975. № 2. С. 368-373.
- [2] Fan T.Y., Yuer R.L. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1988. V. 24. N 6. P. 895-912.
- [3] Куратов И.И. // Электронная промышленность. 1987. № 9. С. 97-102.
- [4] Berger J., Welch D.F., Scifres D.R., Streifer W., Cross P.S. // El. Lett. 1987. V. 23. N 13. P. 669-702.
- [5] Алфёров Ж.И., Арсентьев И.Н., Вавилова Л.С., Гарбузов Д.З., Красовский В.В. // ФТП. 1984. Т. 9. С. 1655-1659.
- [6] Алфёров Ж.И., Арсентьев И.Н., Бер Б.Я., Вавилова Л.С., Гарбузов Д.З., Красовский В.В., Чудинов А.В. // ФТП. 1985. Т. 10. № 6. С. 1108-1114.
- [7] Garbuzov D.Z., Arsentev I.N., Ovchinnikov O.V., Tarasov I.S.

- [8] Антонишкис Н.Ю., Арсентьев И.И., Гарбузов Д.З., Колышкин В.И., Комиссаров А.Б., Кочергин А.В., Налёт Т.А., Стругов Н.А. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 8. С. 699-702.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
1 сентября 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 24

26 декабря 1989 г.

07

### ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛАХ $LiF : F_2^+$ (ОН) С КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ НАКАЧКОЙ

И.И. Кулак, А.И. Митковец,  
В.П. Морозов

В последнее время ведется поиск эффективных способов накачки перестраиваемых лазеров на кристаллах с центрами окраски, обладающих широкими полосами поглощения и люминесценции. На кристаллах такого типа получена генерация как при лазерном возбуждении различной длительности [1], так и широкополосном возбуждении излучением ламп накачки [2] и светодиодной накачке [3]. В рамках поиска более эффективного полного КПД лазерной системы в [4] высказано предположение о возможности использования для получения генерации на центрах окраски излучения полупроводниковых катодолуминофоров.

В настоящей работе впервые сообщается о реализованном режиме перестраиваемой генерации на кристаллах  $LiF : F_2^+$  (ОН) при накачке излучением полупроводниковых источников света с электронным возбуждением. В экспериментах использовался ускоритель с энергией электронов  $\sim 200$  кэВ, плотностью тока пучка до  $1 \text{ кА/см}^2$  и длительностью импульса по полувысоте 1.5 нс. Диаметр выходной анодной фольги 1.4 см. Катодолуминесцентные источники излучения представляли собой пластинки толщиной 100-200 мкм, вырезанные из монокристаллов  $CdS_{1-x}Se_x$  и наклеенные оптическим клеем на кварцевые подложки толщиной 3 мм. Поверхность кристаллов, облучаемая электронным пучком, обрабатывалась по специальной технологии, что позволило почти на порядок повысить мощность излучения. Спектры катодолуминесценции регистрировались на спектральном анализаторе OSA фирмы B & M - *spektronik*.