

Хотя механизм описанного явления до конца не ясен, можно утверждать, что под воздействием лазерного УФ излучения при повышенном давлении кислорода происходит его внедрение в исходную матрицу  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . При обычном давлении или при облучении ИК лазером подобного явления не наблюдалось.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] H e r m a n F., K a s o w s k i R.V.,  
H s u W.Y. // Phys. Rev. 1987. V. B36. N 13.  
P. 6904-6914.
- [2] K e l l y M.K., B a r b o u x P., T a r a s -  
s o n J.-M., A s p n e s D.E., B o n n e r W.A.,  
M o r r i s P.A. // Phys. Rev. 1988. V. B38. N 1.  
P. 870- 873.
- [3] G a r r i g a M., H u m l i č e k J., C a r d o -  
n a M., S c h ö n h e r r E. // Sol. State Com.,  
1988. V. 66. N 12. P. 1231-1235.
- [4] Д о в г и й Я.О., К а р п л ю к Л.Т., К и т ы к И.В.,  
К о т е р л и н М.Д., Л у ц и в Р.В., Н о с а н А.В. //  
ДАН УССР. Сер. А. 1990. № 4. С. 63-66.

Поступило в Редакцию  
22 ноября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 4

26 февраля 1991 г.

06.3; 07; 12

© 1991

УСИЛЕНИЕ СВЕТА В МНОГОМОДОВОМ КВАРЦЕВОМ  
ВОЛОКНЕ, АКТИВИРОВАННОМ  $Nd^{3+}$  ПРИ НАКАЧКЕ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРОМ

М.П. П е т р о в, А.И. З а я ц,  
Р.В. К и я н, Е.А. К у з и н,  
Р.Р. Л о ь я н, В.В. С п и р и н

В последние годы в ряде работ [1-3] было показано, что одно-модовые оптические волокна со световедущей сердцевинной, активированной ионами  $Er^{3+}$ ,  $Nd^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  и некоторых других редкоземельных элементов, могут быть использованы для создания высокоэффективных низкопороговых лазеров и усилителей ближнего ИК диапазона. Накачка волоконных лазеров и усилителей в указанных работах осуществляется одномодовыми полупроводниковыми лазерами. В настоящее время разработаны необходимые для накачки одномодовых активированных волокон полупроводниковые одномодовые

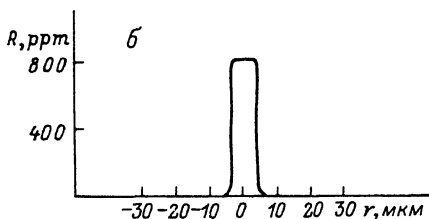
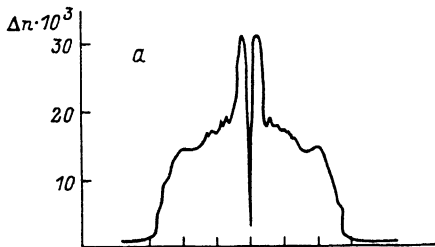


Рис. 1. а - профиль показателя преломления, б - распределение активатора по поперечному сечению волокна.

лазеры, излучающие в диапазонах 0.8, 0.98, 1.48 мкм и некоторых других.

Вместе с тем в ряде случаев желательно использовать для накачки более мощные многомодовые полупроводниковые лазеры, сохранив, однако, при этом одномодовую структуру выходного лазерного излучения. Ввиду того, что принципиально невозможно ввести излучение многомодового полупроводникового лазера в одномодовое волокно без значительных потерь, многомодовые полупроводниковые лазеры могут быть использованы лишь для накачки многомодовых активированных волокон, что на первый взгляд влечет за собой также многомодовый характер излучения волоконного лазера.

В работах [4-5] в качестве активного элемента волоконного лазера был использован световод со сложным профилем показателя преломления, обеспечивающий одновременно одномодовый режим распространения для генерируемого лазерного излучения и существенно многомодовый режим распространения для излучения накачки. Применение подобного световода позволяет использовать многомодовые полупроводниковые лазеры для накачки одномодового волоконного лазера.

В предлагаемой работе сообщается об экспериментальном исследовании волоконного усилителя на основе многомодового кварцевого волокна, активированного  $\text{Nd}^{3+}$  со сложным профилем показателя преломления при накачке многомодовым инжекционным полупроводниковым лазером.

На рис. 1 представлен профиль показателя преломления и распределения активатора по поперечному сечению исследуемого волокна.

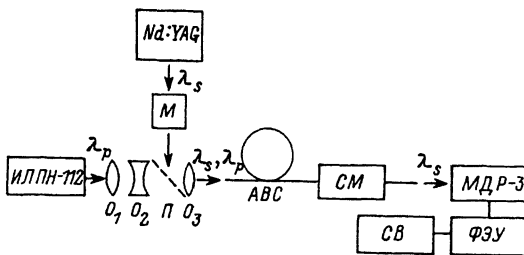


Рис. 2. Схема эксперимента. М - модулятор, СМ - селектор мод, СВ - селективный вольтметр, АВС - активированный волоконный световод,  $\lambda_p$  - длина волны сигнального излучения,  $\lambda_p$  - длина волны излучения накачки.

Волокно состоит как бы из двух световодов: „внешнего“ световода, существенно многомодового на длине волны накачки ( $d_{out} = 56$  мкм,  $\Delta n = 0.032$ ), и „внутреннего“ световода, активированного неодимом, маломодового на длине волны усиливаемого излучения ( $d_{in} = 7.8$  мкм,  $\Delta n = 0.016$ ). Опытные образцы активированного  $Nd^{3+}$  волокна изготовлены методом *MCVD* в НИИЭС совместно с ИРЭ АН СССР. Концентрация неодима во „внутреннем“ световоде равнялась 600–800 ррт, потери в диапазоне 1 мкм не превышали 5дб/км. Максимум люминесценции имел место на длине волны 1.08 мкм.

На рис. 2 представлена схема эксперимента. Для накачки использовался полупроводниковый лазер ИЛПН-112 мощностью 250 мвт, излучающий в диапазоне 803 нм. Излучение лазера ИЛПН-112 с помощью микрообъективов  $O_1$ ,  $O_3$  и корректирующей цилиндрической линзы  $O_2$  вводилось во „внешний“ световод. Расходимость лазерного излучения в плоскости, перпендикулярной р-п переходу, по уровню 0.5 мощности составляла  $50^\circ$  при размерах излучающей области  $2 \times 150$  мкм, поэтому с помощью оптической системы  $O_1-O_2-O_3$  во „внешний“ световод удавалось ввести лишь 30–35 мвт мощности лазера. Введенная во „внешний“ световод накачка поглощалась в активированном неодимом „внутреннем“ световоде, вследствие перекрытия полей мод излучения накачки, распространяющейся по „внешнему“ световоду с активированной центральной жилой. В 30 метровом отрезке волокна поглощалось более 90 % введенной накачки. В качестве усиливаемого сигнального излучения в эксперименте использовалось промодулированное с частотой 1 кГц излучение непрерывного  $Nd:YAG$  лазера. Сигнальное излучение с помощью микрообъектива  $O_3$  и стеклянной пластинки П вводилось во „внутренний“ световод. Селектор мод (СМ) обеспечивал прохождение на выход усилителя лишь излучения, распространяющегося по „внутреннему“ световоду. Усиленное излучение регистрировалось с помощью ФЭУ-62 после прохождения монохроматора МДР-3.

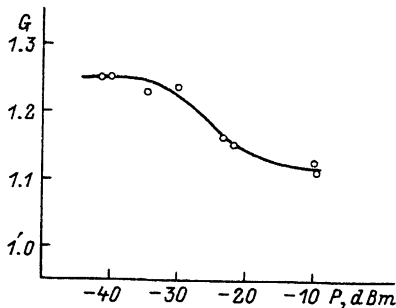


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента усиления волоконного усилителя от мощности входного сигнала. Коэффициент усиления определялся как отношение мощности выходного сигнала при наличии излучения накачки к мощности выходного сигнала без накачки. Измерения проводились для мощности входного сигнала от 0.07 мкВт до 110 мкВт. Малосигнальное усиление составило 1.25. При мощности сигнала 110 мкВт коэффициент усиления уменьшался до 1.1.

В предположении слабого изменения населенности основного уровня, малости усиления и малости потерь, коэффициент усиления в оптическом волокне, активированном  $Nd^{3+}$ , имеет вид [6]

$$G = \frac{P \cdot T \cdot \epsilon \cdot \eta}{h \cdot \nu_p \cdot S}, \quad (1)$$

где  $P$  - мощность поглощенной в волокне накачки,  $\epsilon$  - сечение спонтанного излучения,  $\eta$  - квантовая эффективность,  $T$  - спонтанное время жизни лазерного перехода,  $h \cdot \nu_p$  - энергия фотона накачки,  $S$  - эффективная площадь поперечного сечения световедущей жилы.

Согласно (1) для того, чтобы достичь коэффициента усиления, равного 1.25, на длине волны 1.06 мкм при типичных значениях параметров  $\epsilon$ : ( $\epsilon_{\max, \lambda=1.06} = 1.5 \cdot 10^{-24} \text{ м}^2$ ,  $\epsilon_{\lambda=1.06} = 0.6 \times \epsilon_{\max, \lambda=1.06}$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $T = 350 \text{ мкс}$ ), в одномодовое волокно с диаметром световедущей жилы  $d = 7.8 \text{ мкм}$  необходимо ввести излучение накачки мощностью 20 мВт, а в ступенчатое многомодовое волокно с диаметром центральной жилы  $d = 56 \text{ мкм}$  около 1000 мВт.

В нашем эксперименте за счет использования волокна со сложным профилем показателя преломления коэффициент усиления, равный 1.25 на длине волны 1.06 мкм, удалось получить в многомодовом оптическом волокне ( $d_{\text{out}} = 56 \text{ мкм}$ ) при сравнительно низкой (30 мВт) мощности поглощенной в волокне накачки.

Таким образом нами впервые экспериментально реализован усилитель бегущей волны на основе многомодового кварцевого волокна, активированного  $Nd^{3+}$  со сложным профилем показателя преломления, с накачкой многомодовым полупроводниковым лазером ИЛПН-112.

Полученное в эксперименте усиление в активированном волокне в принципе достаточно для построения волоконного лазера, однако для использования волокна в усилителях необходимо иметь больший коэффициент усиления.

Следует отметить, что коэффициент усиления может быть значительно увеличен, во-первых, за счет повышения эффективности ввода излучения полупроводникового лазера в многомодовый „внешний” световод при использовании более короткофокусной, просветленной оптики, во-вторых, за счет уменьшения диаметра „внутреннего” световода (в соответствии с (1)) и, в-третьих, за счет обеспечения одномодового режима распространения сигнального излучения по „внутреннему” световоду, что обеспечивает лучшее перекрытие поля моды сигнального излучения с активированной областью. Кроме того, коэффициент усиления может быть увеличен за счет выбора длины волны сигнального излучения, равной 1.08, а не 1.06 мкм, как это имело место в эксперименте, так как интенсивность люминесценции на длине волны 1.08 мкм почти в 2 раза превышает интенсивность люминесценции на длине волны 1.06 мкм.

Усилитель может быть использован в различных волоконно-оптических системах: волоконных датчиках, волоконных гироскопах, системах обработки сигналов на волоконных линиях задержки и т.п. Особенно перспективно, по-видимому, использование подобного усилителя в когерентных системах.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] R e e k i e L., M e a r s R.J., P o o l e S.B., P a y n e D.N. // J. Ligh. Technol. 1986. V. LT-4. N 7. P. 956-960.
- [2] V o d h a n e l R.S., L a m i n g R.I. at al. // Electr. Lett. 1989. V. 25. N 20. P. 1386-1388.
- [3] H a n n a D.C., P e r c i v a l R.M., S m a r t R.G., T r o p p e r A.C. // Opt. Comm. 1990. V. 75. N 3, 4. P. 283-286.
- [4] B u r n s D.S., D u l i n g I.N. at al. // Springer Proc. in Phisics. 1989. V. 44. P. 137-142.
- [5] G a p o n t s e v V.P., S a d o v s k y P.I., S a m a r t s e v I.E. Proc. of CLEO-90, Calif., 1990. CPD P38-1. P. 682-683.
- [6] M o r k e l P.R. // Electr. Lett. V. 24. N 10. P. 608-609.