

ПРОГРЕСС МЕТОДОВ СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКИ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ РАЗНООБРАЗНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кузяков Борис Алексеевич

канд. физ. –мат. наук, доцент, МИРЭА - Российский технологический университет, РФ, г. Москва

PROGRESS IN SOLAR PUMPING METHODS FOR FIBER LASERS FOR A VARIETY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES

Boris Kuzyakov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Moscow State Technical University MIREA, Russia, Moscow

Аннотация. В работе рассмотрен прогресс методов солнечной накачки волоконных лазеров для разнообразных промышленных технологий. Приведены несколько вариантов схем солнечной накачки волоконных лазеров. В методе прямой солнечной накачки, в дальнейшем, предполагается использовать многосердцевинную структуру волонного световода, состоящую из нескольких активных сердцевин и нескольких световодов накачки. Во втором методе рассмотрены пути модернизации полупроводниковых лазерных излучателей на длине волны 980 нм для накачки активных световодов. Приведены несколько типов распространенных лазерных излучателей. Сравниваются спектры поглощения однопереходного и каскадного солнечного элемента. Показаны зависимости КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях концентрирования солнечного излучения.

Abstract. The paper considers the progress of solar pumping methods for fiber lasers for various industrial technologies. Several variants of schemes for solar pumping of fiber lasers are presented. In the method of direct solar pumping, in the future, it is supposed to use a multi-core structure of a fiber light guide consisting of several active cores and several pumping light guides. The second method considers the ways of modernization of semiconductor laser emitters at a wavelength of 980 nm for pumping active light guides. Several types of common laser emitters are given. The absorption spectra of a single-junction and cascade solar cell are compared. The dependences of the efficiency of a cascade solar cell on temperature at different multiplicities of solar radiation concentration are shown.

Ключевые слова: волоконный лазер; солнечная накачка; промышленные технологии; варианты схем; волонный световод; многосердцевинная структура; лазерный излучатель; полупроводниковый; солнечный элемент; однопереходный; каскадный; солнечное излучение; кратности концентрирования.

Keywords: fiber laser; solar pumping; industrial technologies; circuit options; fiber light guide; multi-core structure; laser emitter; semiconductor; solar cell; single-junction; cascade; solar radiation; concentration factors.

Для энергоснабжения лазерных систем связи особенно в труднодоступных регионах, по обширному ряду причин, чаще используют преобразованную энергию Солнца. В действительности, библиография по лазерам, включая новые волоконные лазеры (ВЛ) с солнечной накачкой (СН) весьма ёмкая [1, 2] Схема волоконного лазера с солнечной накачкой по варианту №1, приведена на рис. 1. Центр полосы люминесценции ионов Er^{3+} в кварцевом стекле – 1,53 мкм, это позволяет реализовать волоконные лазеры и усилители в спектральном диапазоне 1,53 – 1,6 мкм. Источники излучения с использованием волоконных световодов, легированных ионами Er^{3+} эрбия, работают по трехуровневой схеме. В реализации эрбиевого волоконного лазера используют накачку в оболочку излучением на длине волны $\lambda = 980$ нм.

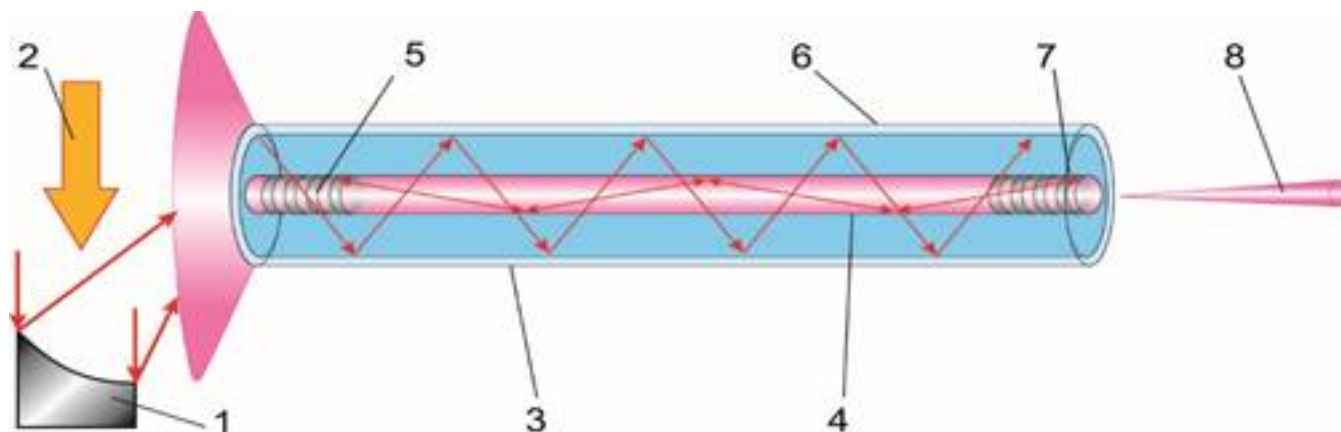


Рисунок 1. Схема волоконного лазера с прямой солнечной накачкой, вариант № 1:

1 - фрагмент гелиоконцентратора; 2 - излучение накачки; 3 - оболочка волновода накачки; 4 - активное волокно; 5 - волоконная брэгговская решетка; 6 - внешняя оболочка волновода; 7 - полупрозрачное зеркало; 8 - выходное излучение

На этом рисунке, слева показан фрагмент гелиоконцентратора (вид сбоку). Волоконная брэгговская решетка выполняет функцию плотного зеркала. В конструкции гелиоконцентратора, на всей отражающей поверхности, нанесен пленочный фильтр для выделения выбранного диапазона волн накачки. В активном волокне (4), при накачке солнечным излучением, генерируется лазерное излучение. Для повышения эффективности солнечной накачки в ВЛ-СН по варианту №1, в дальнейшем предлагается: 1) Увеличить апертуру активного волокна; 2) Использовать многосердцевинную структуру волонного световода, состоящую из нескольких активных сердцевин и нескольких световодов накачки; 3) Оптимизировать согласование излучения концентратора с входной апертурой активного волокна; 4) Ввести систему слежения за Солнцем. Схема ВЛ с солнечной накачкой по варианту № 2, с основными волоконно-оптическими элементами, приведена на рис. 2.

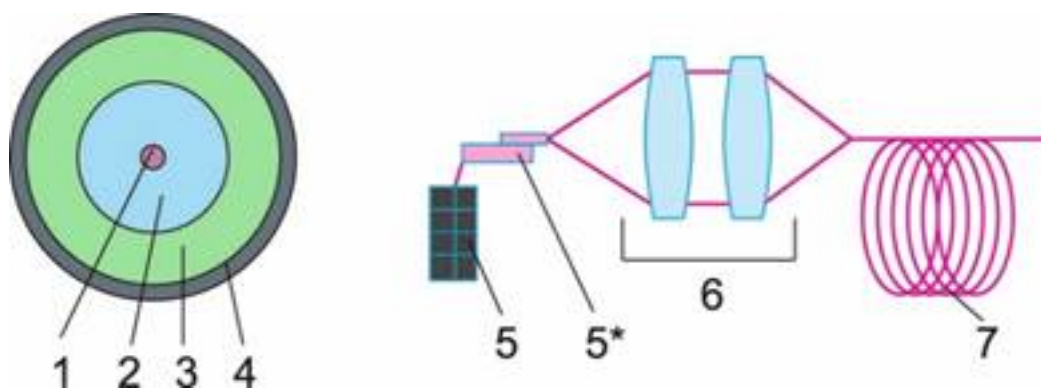


Рисунок 2. Схема волоконного лазера с солнечной накачкой, вариант № 2:

1- легированная сердцевина, 2 - кварцевое волокно, 3 - полимерная оболочка, 4 - защитное покрытие, 5 - солнечные батареи, 5* - лазерные диоды накачки, 6 - оптическая схема накачки, 7 - оптическое активное волокно.

В этом варианте, накачка активного волокна реализуется на базе лазерных диодов (5*) с длиной волны излучения 0,98 мкм для накачки активного волокна применением оптической фокусирующей системы (6). В схеме используется волновод (7) - с одной сердцевиной, активированный ионами Er^{3+} . В наши времена полупроводниковые лазерные излучатели разрабатывают и выпускают малыми и большими сериями множество разных фирм, что обусловило большое разнообразие их конструктива. Несколько типов распространенных лазерных излучателей показаны на рис 3.

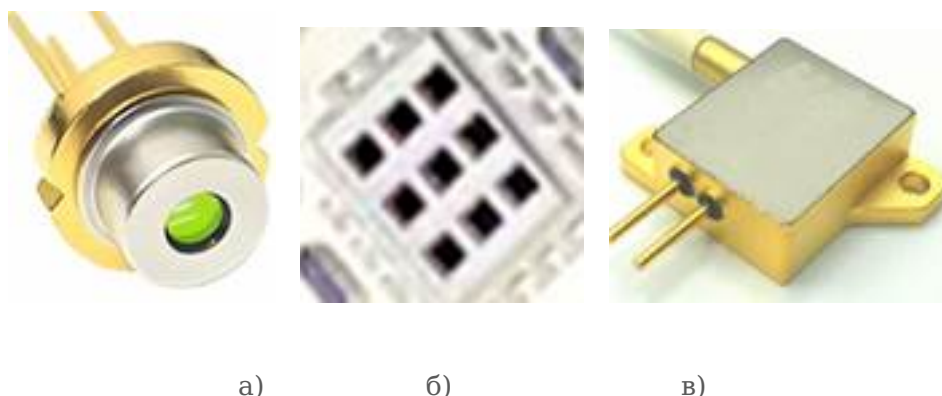


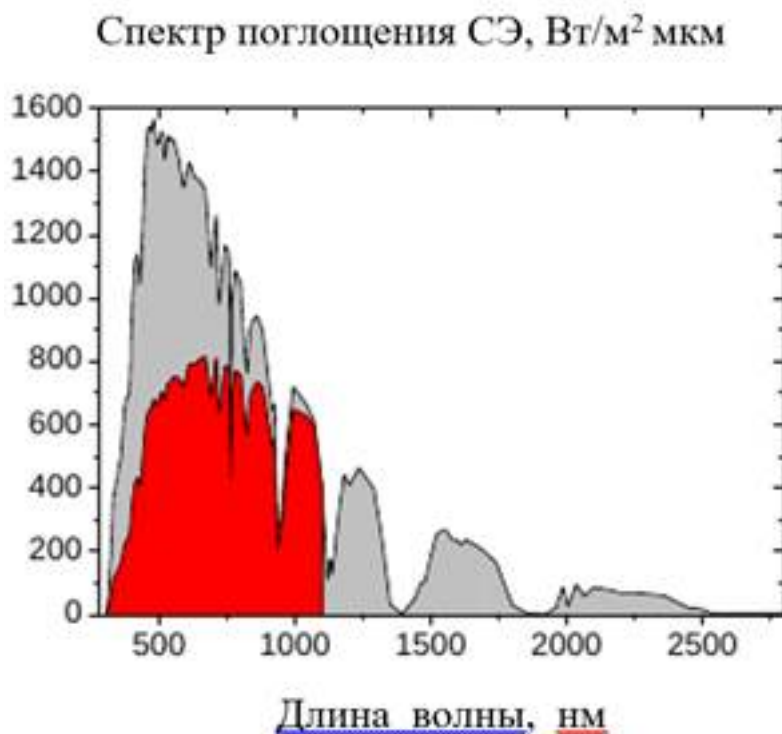
Рисунок 3. Варианты полупроводниковых лазерных излучателей:

а) диапазон 1018нм; б) диапазон 980 нм; в) диапазон 940 нм

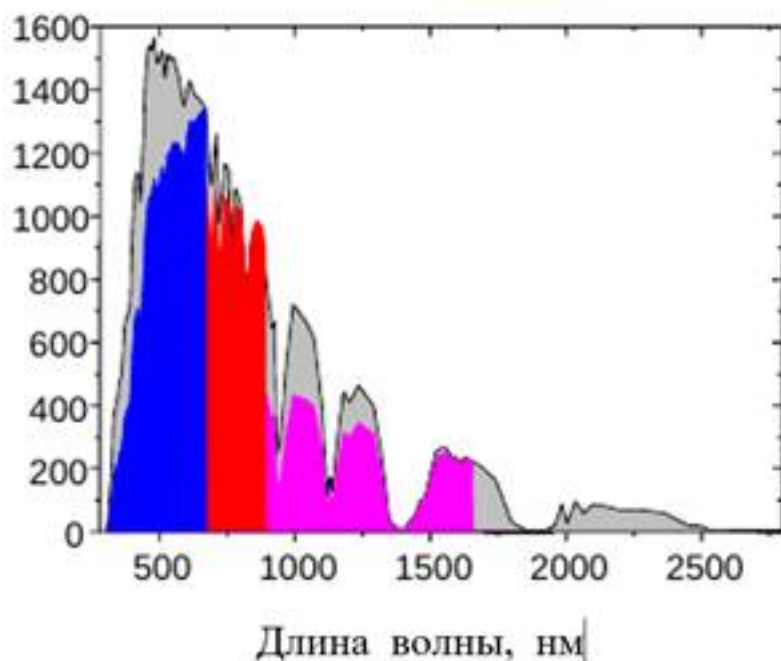
При использовании лазерного излучателя, кроме центральной длины волны

(980нм) и рабочей температуры (25⁰С), приводят ряд дополнительных параметров [3, 4]. В первую очередь, к ним относятся: отклонение центральной длины волны (+/- 3 нм); максимальная выходная мощность в непрерывном режиме генерации (4 - 200 Вт); ширина спектра на уровне 90% мощности ($\leq 3.5 - 4.0$ нм); температурный сдвиг длины волны (0.3 нм/⁰С); пороговый ток накачки (0.5 - 1.8 А); рабочий ток (3.0 - 12.0 А); рабочее напряжение (2.2 - 32 В). Мощность излучения лазерных диодов (5) практически линейна в большом диапазоне токов при разной температуре (-60 ⁰С - + 55 ⁰С). Для повышения эффективности солнечной накачки в ВЛ-СН по варианту №2, в дальнейшем предлагается: 1) Модернизация полупроводниковых лазерных излучателей (ПЛУ) на длине волны 980 нм для накачки

активного световода; 2) Совершенствование солнечных элементов. По пп. 1, недавно было показано увеличение КПД солнечных ячеек при повышении температуры термического отжига плёнок [4]. Воздействие наночастиц MoS_2 ... на параметры солнечных элементов рассматривалось в работе январской (2025 г.) конференции в Москве [5]. Наряду с этим, повышение эффективности флуоресценции обнаружено в нанокompозитах на основе квантовых точек [6]. В наше время КПД обычных солнечных элементов (СЭ) , в среднем, составляет 20 %. Для ряда применений это оказывается недостаточным. Преодоление такого положения возможно при переходе от однопереходных к каскадным СЭ. В свою очередь, разработки каскадных солнечных элементов на основе наногетероструктур GaInP/GaInAs/Ge ведутся по нескольким основным направлениям: 1. Совершенствование известной технологии металлоорганического химического осаждения из паровой фазы (MOCVD) путём пиролиза для роста соединений A_3B_5 в системах Al-Ga-In-P и Al-Ga-In-As [2-1], при этом площадь ФЭП может превышать $\sim 30 \text{ см}^2$; 2. Применение MOCVD технологии роста соединений A_3B_5 на подложке Ge для формирования: p-n переходов в Ge, подавления автолегирования и т.п.* 3. Создание квантово-размерных фронтальных «окон» (20 – 30 нм) из Al-Ga-In-P , для повышения fotocувствительности до ультрафиолета; 4. Оптимизация встраивания Брегговских отражателей в гетероструктуру на основе периодических структур со слоями толщиной 50 – 70 нм, для отражения «подзонных» фотонов в фотоактивную область; 5. Применение сверхрешёток для создания структур с градиентом в ширине запрещённой зоны. Для более полного понимания сущности процесса, приводим. спектры поглощения однопереходного и каскадного СЭ (КСЭ) (рис. 4).



Спектр поглощения СЭ, Вт/м² мкм



а)

б)

Рисунок 4. Спектры поглощения (выделены цветом) однопереходного (а) и каскадного СЭ (б). Солнечный спектр представлен в серых тонах

Приведенные графики показывают расширение спектрального диапазона каскадных СЭ и большую их эффективность [7]. Дополнительное повышение эффективности СЭ достигается при использовании концентрирования солнечного излучения на его поверхность [8]. На рис. 5 показаны зависимости КПД КСЭ при различных кратностях концентрирования солнечного излучения (СИ).

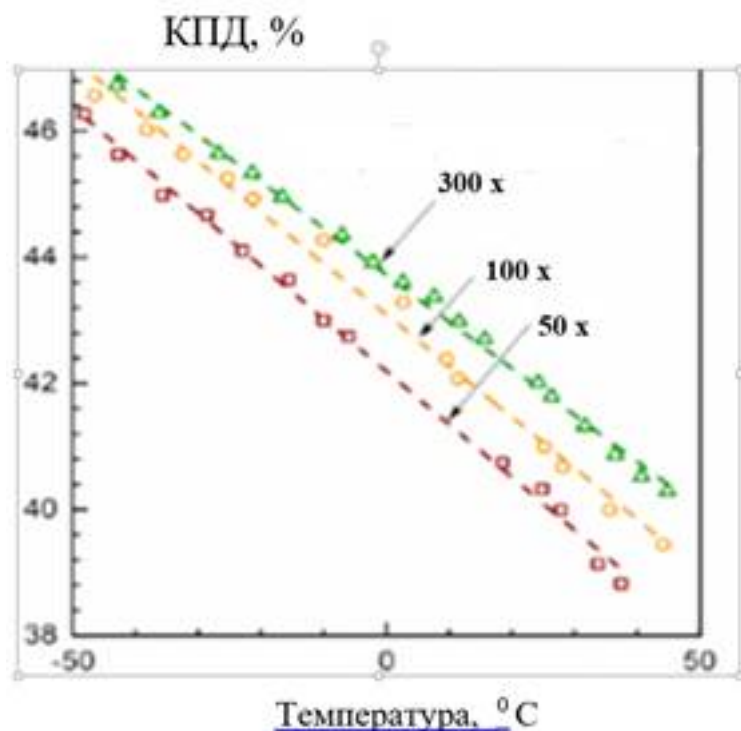


Рисунок 5. Зависимости КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях концентрирования СИ в наземных условиях

Приведённые зависимости показывают, что КПД каскадного СЭ может превышать значение 46 %, что более чем в 2 раза превышает упомянутое среднее значение сегодняшнего дня. При анализе работы СЭ иногда используют другой термин – фотоэлектронный преобразователь (ФЭП). Следует заметить, что эффективность ФЭП, размещенных в модуле, несколько снижается в сравнении с размещением его в свободном положении. При этом, максимальный КПД не превышает 40 %. Таким образом, в работе приведены несколько схем солнечной накачки ВЛ. Рассмотрены пути модернизации ПЛУ на длине волны 980 нм для накачки активных световодов. Показаны зависимости КПД СЭ от температуры при различных кратностях концентрирования солнечного излучения.

Список литературы:

1. Макаренко К.И. Волоконный лазер с солнечной накачкой. Всесоюзная нтк студентов. Студенческая научная весна 2017: Машиностр. технологии, с. 12-18; <http://studvesna.ru>.
2. Кузяков Б.А. Новые аспекты прямой солнечной накачки волоконных лазеров на спутниковых трассах. Сб. науч. ст. м. н.-пр. конф. "Инновационные научные исследования: теория, методология, тенденции развития". - 2021, с. 28 - 37.
3. Makarov S., Furasova A., Tiguntseva E., et al. Halide-Perovskite Resonant Nanophotonics. Advanced optical Materials. -2019, No. 7, p. 1800784 -18007803; www.advopticalmat.de.
4. Мусабекова А.К., Аймуханов А.К., Зият А.З., Мусабек Н.К. Влияние параметров термического отжига плёнок SnO₂ на фотовольтаческие характеристики органических солнечных ячеек. Сб. научн. Тр. XIII М. конф. по Фотонике и информационной оптике. - 2023, Москва, с. 291-292.
5. Аймуханов А.К., Зейниденов А.К., Ильясов Б.Р., и др. Влияние наночастиц MoS₂ на вольт-амперные характеристики солнечных элементов. Программа XIV Международной

конференции по Фотонике и информационной оптике. – 2025, Москва, с. 19.

6. Карпач П.В., Василюк Г.Т., Айт А.О., Горелик А.М., Маскевич С.А. Эффективность модуляции флуоресценции фотохромных нанокомпозитов на основе квантовых точек и хромонов. Сборник научных трудов XIII М. конф. по Фотонике и информационной оптике. – 2023, Москва, с. 293 -294.

7. Минтаиров М.А. ФТИИм. А.Ф. Иоффе, лаб. Фотоэлектрических преобразователей. Минтаиров.pdf...(13 с.); сайт: pvlab.ioffe.ru.

8. Андреев В.М., Давидюк Н.Ю., Калиновский В.С. и др. Концентраторные солнечные модули с высокой эффективностью в широком диапазоне рабочих температур. ФТИРАН, СПб; hse.ru-data/2018/03/23/1164014176/2_Андреев.