

Накачка лазеров на красителях полупроводниковыми инжекционными лазерами

О.А.Бурдукова, В.А.Петухов, М.А.Семенов

Полупроводниковые лазеры активно используются для оптической накачки различных твердотельных лазеров, таких как Nd:YAG, Nd:YVO₄, Ti:Sapphire, Cr:Colquiriite, Cr:Alexandrite и др. Применение диодной накачки позволяет значительно уменьшить габаритные размеры лазерных систем и снизить их стоимость. Неоднократно предпринимались попытки возбуждения лазеров на красителях полупроводниковыми лазерами, но эффективность таких систем была крайне низка из-за нехватки мощности излучения накачки. Приемлемые результаты были получены только после появления мощных полупроводниковых лазеров видимого диапазона (445 нм и 520 нм, Nichia). При использовании различных схем накачки полупроводниковыми лазерами получены широкие диапазоны перестройки длины волны генерации (~200 нм), достигнута генерация с высоким КПД (26%), осуществлена диодная накачка непрерывного лазера на красителе, а также продемонстрирована синхронизация мод (длительность импульсов около 200 пс). Ниже представлен обзор исследований, посвященных диодной накачке лазеров на красителях.

Ключевые слова: лазер на красителе, диодная накачка, перестраиваемые лазеры, лазерные красители.

1. Введение

Полупроводниковые инжекционные лазеры с момента опубликования идеи Н.Г.Басовым с сотрудниками [1] прошли впечатляющий путь развития и сейчас используются в самых разных областях. Их применение для накачки других лазеров, в основном твердотельных, позволило радикально улучшить массогабаритные и другие характеристики таких лазеров. Настоящая статья посвящена применению полупроводниковых инжекционных лазеров, иначе говоря, лазерных диодов, для накачки лазеров на красителях.

С момента своего открытия лазеры на красителях привлекали внимание исследователей возможностью перестройки длины волны в широком диапазоне, что оказалось востребованным в спектроскопии, лазерном разделении изотопов, медицине и во многих других областях науки и техники. Благодаря широкой области усиления лазеры на красителях впервые позволили генерировать ультракороткие импульсы в субпикосекундном и фемтосекундном диапазонах [2, 3]. В настоящее время в связи с появлением титан-сапфирового и других перестраиваемых твердотельных лазеров лазеры на красителях стараются заменить более удобными в эксплуатации твердотельными лазерами. Однако в ряде случаев такая замена затруднена или невозможна. Диапазон перестройки лазеров на титане в сапфире составляет 680–1100 нм, длина волны второй гармоники находится в диапазоне 340–550 нм, и область спектра 550–680 нм остается недостижимой. Она может быть перекрыта параметрическими генераторами, однако эти устройства довольно дороги.

О.А.Бурдукова, В.А.Петухов, М.А.Семенов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: petuhovva@lebedev.ru

Поступила в редакцию 2 сентября 2024 г., после доработки – 21 октября 2024 г.

Поэтому в настоящее время лазеры на красителях продолжают производиться рядом фирм: Техноскан (Россия), Quantel, Radiant и др. Главные недостатки лазеров на красителях – использование в большинстве случаев жидкой активной среды и сложность системы накачки, которая, как правило, имеет большие размеры и стоит дороже самого лазера. Поэтому миниатюризация и удешевление системы накачки лазеров на красителях всегда являлись актуальной задачей. Подобная задача стояла и перед твердотельными лазерами на кристаллах, но она была успешно решена путем накачки активной среды полупроводниковыми инжекционными лазерами. В настоящее время осуществляется такая накачка лазеров на неодиме, иттербии, хrome в кольквиридах (LiSAF, LiCAF, LiSGaF), празеодиме, хrome в александрите (Cr:BeAl₂O₄), сапфире (рубин) [4–13].

2. Особенности накачки лазеров полупроводниковыми лазерами

Попытки использовать для накачки лазеров на красителях полупроводниковые инжекционные лазеры предпринимались, насколько нам известно, с начала 1970-х годов, и первой успешной попыткой была работа [14], в которой была получена генерация инфракрасного полиметинового красителя на длине волны ~1 мкм в капилляре при накачке полупроводниковым лазером с длиной волны 820 нм и мощностью до 9 Вт в импульсном режиме. КПД лазера достигал 2.5% с капилляром Ø30 мкм и 4.4% с капилляром Ø20 мкм. Конструкция лазера не позволяла осуществлять перестройку длины волны дисперсионными элементами и получать узкую линию, перестройка могла осуществляться только изменением концентрации красителя. К тому же разработка в течение нескольких последующих лет перестраиваемых лазеров на хrome в александрите и титане в сапфире сделала неактуальным применение лазеров на красителях в инфракрасном диапазоне. Однако работы в этом направлении продолжа-

лись [15, 16], и в 1994 г. с помощью фильтра Лию впервые была осуществлена непрерывная перестройка длины волны генерации лазера на красителе Родамин-700 при накачке двумя красными полупроводниковыми лазерами. Диапазон перестройки составил 735–775 нм, а КПД в максимуме кривой перестройки – всего 0.5% [17].

В дальнейшем неоднократно предпринимались попытки накачки более коротковолновых красителей полупроводниковыми лазерами [18–25], но в течение почти 40 лет результаты были очень скромные: КПД не превышал 2%–3%, перестройка длины волны генерации не была осуществлена, т.е. не было реализовано главное преимущество лазеров на красителях. В то же время накачка полупроводниковыми лазерами активных сред с ионами неодима оказалась очень успешной и привела к уменьшению габаритных размеров, увеличению КПД и во многих случаях к удешевлению неодимовых лазеров. Главная причина такого положения дел заключается в малом времени жизни молекул красителей в возбужденном состоянии, из-за чего требуется большая плотность мощности накачки для создания инверсной населенности.

К красителям относят вещества, молекулы которых интенсивно поглощают свет за счет наличия чередующихся двойных химических связей, образующих хромофорную систему молекулы. По хромофорной системе электроны могут передвигаться почти свободно, что позволяет рассматривать такие молекулы как «потенциальный ящик» для электронов с размером, приблизительно равным длине хромофорной цепи. Удивительно, но такой упрощенный подход позволяет почти точно предсказать положение длинноволнового максимума поглощения молекул [26]. В результате у молекул красителей разных классов оказывается много схожих характеристик и все молекулы красителей принято описывать единой обобщенной схемой энергетических уровней Яблонского, приведенной на рис. 1. Схема включает в себя систему

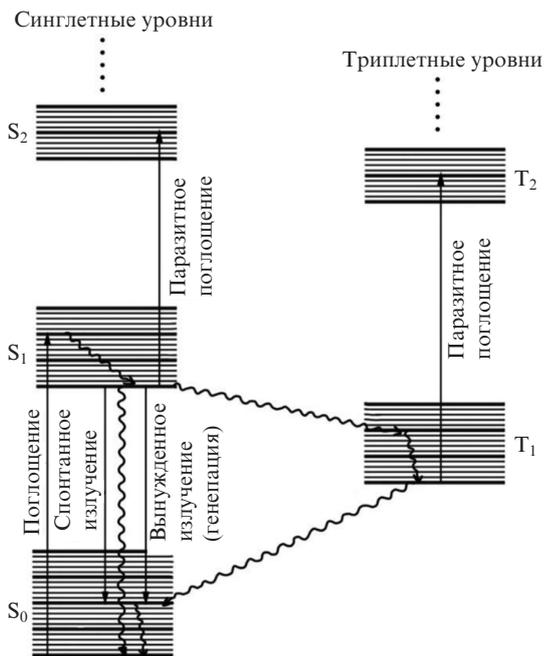


Рис. 1. Схема Яблонского энергетических уровней молекул красителей (прямыми стрелками изображены переходы с поглощением или излучением фотонов, волнистыми – безызлучательные переходы, сопровождающиеся возбуждением внутримолекулярных колебаний и перераспределением энергии по колебательным состояниям).

синглетных S_0, S_1, S_2, \dots и триплетных T_1, T_2, \dots уровней с колебательными подуровнями. Оптические переходы на очень высокие колебательные подуровни маловероятны из-за малой величины матричных элементов перехода, поэтому эффективной шириной синглетных уровней можно считать величину $\Delta E \sim (2-3) \times 10^3 \text{ см}^{-1}$. Эта ширина и определяет возможную область перестройки длины волны излучения лазера на красителе. После поглощения фотона накачки происходит колебательная релаксация в течение долей пикосекунды, молекулы переходят на низкие колебательные подуровни S_1 , передавая высвобождающуюся энергию окружению молекулы. С этих подуровней молекулы переходят на нижний электронный уровень S_0 за счет спонтанного излучения, безызлучательной внутренней конверсии, а также вынужденного излучения, если молекулы участвуют в лазерной генерации. Радиационное время жизни на S_1 (без учета внутренней конверсии) у всех красителей имеет порядок 10^{-8} с , но реальное время жизни на S_1 может быть существенно короче, вплоть до 10^{-13} с , за счет быстрой внутренней конверсии.

Для лазерных красителей внутренняя конверсия – вредный процесс, препятствующий накоплению молекул на возбужденном уровне и созданию инверсной населенности. Для красителей, используемых в качестве насыщающихся поглотителей при пассивной синхронизации мод, наоборот, она позволяет уменьшить время релаксации просветленного состояния и укоротить генерируемые импульсы. У хороших лазерных красителей безызлучательные переходы $S_1 \rightarrow S_0$ происходят с малой скоростью, по сравнению с излучательными, и время жизни на S_1 близко к радиационному. Например, у красителя родамин 6Ж в этаноле время жизни на S_1 равно приблизительно 4 нс, что всего на 8% меньше радиационного. Сечения усиления у молекул всех красителей одного порядка, $\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$. Из-за того, что перераспределение по колебательным состояниям молекул красителей происходит очень быстро, следует, что все лазеры на красителях работают по четырехуровневой схеме и инверсная населенность фактически равна концентрации возбужденных молекул.

Коэффициент усиления активной среды любого лазера пропорционален сечению усиления атомов или молекул σ и величине инверсной населенности, которая, в свою очередь, для четырехуровневой схемы пропорциональна концентрации возбужденных частиц. Концентрация возбужденных частиц, в свою очередь, пропорциональна времени жизни τ на возбужденном уровне при прочих равных условиях. В результате коэффициент усиления оказывается пропорциональным произведению сечения усиления атомов/молекул на их время жизни в возбужденном состоянии. Следовательно, пороговая мощность накачки, необходимая для достижения заданного усиления, обратно пропорциональна произведению $\sigma\tau$. У ионов неодима в ванадате сечение усиления $\sigma = 25 \times 10^{-19} \text{ см}^2$, время жизни на верхнем лазерном уровне $\tau \approx 90 \text{ мкс}$, произведение $\sigma\tau \sim 2 \times 10^{-22} \text{ с} \cdot \text{см}^2$. У красителей типичная величина сечения усиления $\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$, время жизни на верхнем уровне $\tau \sim 10^{-8} \text{ с}$, $\sigma\tau \sim 10^{-24} \text{ с} \cdot \text{см}^2$. Таким образом, для достижения одинакового коэффициента усиления красителям требуется на два порядка более мощная накачка при одинаковых размерах активной области. В табл. 1 приведены типичные значения сечений усиления и времен жизни на верхнем лазерном уровне нескольких лучших в своем классе лазерных сред.

Табл.1. Характерные значения сечений усиления, времени жизни в возбужденном состоянии и их произведения для различных сред.

Активная среда	σ (10^{-20} см ²)	τ (мкс)	$\sigma\tau$ (10^{-26} с·см ²)
Nd:YVO ₄	250	90	2×10^4
Nd:YAG	28	260	7.3×10^3
Yb:YAG	2.0	1.2×10^3	2.4×10^3
Cr:LiSAF	4.8 (//c)	67	322
Cr:LiSGaF	3.3 (//c)	88	290
Cr:LiCAF	1.3 (//c)	175	228
Cr:Alexandrite	0.7 (//b)	262	183
Ti:Sapphire	41 (//c)	3.2	131
Родамин 6Ж	2×10^4	4×10^{-3}	80
DCM	1.6×10^4	1.3×10^{-3}	21

Из табл.1 видно, что среди твердотельных кристаллических активных сред самый низкий порог накачки имеют неодимовые (ванадат) среды, самый высокий – титан в сапфире, а одни из лучших лазерных красителей Родамин 6Ж и DCM заметно уступают всем остальным средам. При продольной накачке в непрерывном режиме растворов лучших лазерных красителей в непрерывном режиме для достижения усиления порядка 10% на проход требуется интенсивность накачки 50–100 кВт/см². При импульсной накачке необходимо обеспечить еще большее усиление, чтобы за время импульса накачки спонтанное излучение успело усилиться до уровня, при котором скорость переходов под действием вынужденного излучения сравнима со скоростью спонтанных переходов. Поэтому требуется более высокая интенсивность накачки. Реально для комфортной работы при накачке импульсами длительностью в десятки наносекунд требуется интенсивность накачки порядка нескольких сотен кВт/см² или более. В литературе встречаются работы, в которых была достигнута генерация вынужденного излучения растворов красителей при рекордно низких интенсивностях квазипродольной непрерывной накачки – 20 кВт/см² [27] и даже 550 Вт/см² [16], но при этом применялось охлаждение раствора красителя до температуры ниже комнатной и использовались очень плотные зеркала резонатора, при которых наружу выходила ничтожная часть вынужденного излучения. Практического значения такие лазеры не имеют.

Полупроводниковые инжекционные лазеры обычно работают в непрерывном режиме или в квазинепрерывном режиме с малой скважностью. Их можно питать и короткими импульсами тока, но импульсная выходная мощность не может существенно превышать допустимую паспортную мощность для непрерывного режима во избежание разрушения р–п-перехода и прогорания выходных зеркал. В современных полупроводниковых лазерах плотность мощности излучения на выходном зеркале почти достигла еще недавно казавшейся фантастической величины ~ 100 МВт/см² и, видимо, близка к пределу. Поэтому для увеличения мощности приходится увеличивать ширину р–п-перехода до десятков и даже сотен микрометров при толщине перехода порядка 1 мкм. В результате возникает сильная асимметрия: расходимость выходного излучения по «быстрой» оси (перпендикулярно р–п-переходу) хотя и велика, но близка к дифракционно-ограниченной, а по «медленной» оси может превышать в 10–20 раз и более дифракционную расходи-

мость. Такое излучение невозможно сфокусировать в маленькое круглое пятно для достижения высокой плотности мощности. Одномодовые полупроводниковые лазеры, используемые в DVD- и BluRay-приводах, обеспечивают почти дифракционную расходимость по обеим осям, но их мощность заметно меньше 1 Вт. Реально с современными лазерами видимого диапазона спектра при продольной накачке и фокусировке линзами с разумными фокусными расстояниями с трудом можно достичь плотности в несколько сотен кВт/см², что является необходимым минимумом для накачки лазеров на красителях. Следует отметить, что при поперечной накачке необходимое усиление можно обеспечить с меньшей плотностью возбуждающего излучения за счет большей длины усиливающей области.

3. Обзор достижений

Впервые генерация лазеров на красителях в видимой области при накачке полупроводниковыми лазерами была получена в 2006 г. [18, 20]. Из последующих исследований в этой области можно выделить направление с условным названием «тонкопленочные лазеры с поперечной накачкой». Активный элемент такого лазера представляет собой тонкую полимерную пленку, нанесенную на подложку с периодическим рельефом поверхности и меньшим, чем у пленки, показателем преломления, в результате образуется волновод (рис.2). В пленку внедрены молекулы лазерного красителя в большой концентрации. Типичная толщина полимерной пленки – сотни нанометров. Накачка осуществляется перпендикулярно поверхности пленки, а генерируемое лазерное излучение распространяется вдоль пленки. За счет рельефа поверхности подложки происходит модуляция толщины пленки, а значит, и модуляция эффективного показателя преломления волновода, что обеспечивает распределенную обратную связь за счет брэгговского отражения. Возникает трудность с выводом излучения наружу, но эта проблема решается несколькими способами. Например, для обратной связи используется изменяемый период модуляции рельефа: в одной части накачиваемой области период модуляции равен половине длины волны (в среде), и брэгговское отражение происходит в первом порядке дифракции, а в другой части – период модуляции рельефа вдвое больше. Здесь отражение внутри активного слоя происходит во втором порядке, а первый порядок «рождает» дифракцию излучения перпендикулярно поверхности и обеспечивает вывод излучения наружу, как показано на рис.2. За счет большой концентрации молекул красителя излучение накачки практически полностью поглощается в тонком активном слое, обеспечивая большую концентрацию возбужденных молекул и значительное усиление излучения. В результате пороговая интенсивность накачки у тонкопленочных лазеров минимальна и может со-

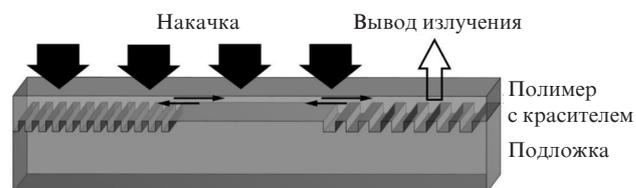


Рис.2. Схематичное изображение тонкопленочного (thin-film) лазера на красителе с распределенной обратной связью.

ставлять до 200 Вт/см^2 [28, 29]. Есть работы, в которых удалось получить заметное усиление в тонкой пленке даже при накачке матрицей светодиодов [28–30]. При этом в работах [28, 30] светодиоды приходилось питать током, существенно большим, чем 100 А , превышая номинальный ток на два порядка. Разрушения светодиодов не происходило, потому что длительность импульсов тока не превышала десятков наносекунд. Выходные параметры таких лазеров очень скромные, фактически лишь продемонстрирована принципиальная возможность достижения усиления при накачке светодиодами.

Длина волны выходного излучения тонкопленочных лазеров определяется периодом распределенной обратной связи и эффективным показателем преломления активного слоя. Эффективный показатель преломления зависит не только от показателя преломления вещества, но и от толщины активного волноводного слоя. Длину волны лазера можно изменять путем замены образца на другой или механическим передвижением подложки, на которой размещен набор лазеров с разными параметрами. В работе [31] продемонстрирована структура с плавным изменением толщины активного слоя от одного края подложки к другому, что позволяет плавно перестраивать длину волны при передвижении образца. Тонкопленочные лазеры миниатюрны, могут встраиваться в оптоэлектронные чипы и поэтому привлекают внимание исследователей. Недостатками являются малая выходная энергия, потери при выводе излучения наружу и трудности с перестройкой длины волны.

Лазеры с объемным активным элементом могут быть жидкостные и твердотельные (обычно полимерные). После первой работы, в которой была получена генерация лазера на красителе в области $\sim 1 \text{ мкм}$ при накачке очень мощным для того времени (9 Вт) инжекционным лазером, основные усилия были сосредоточены на продвижение в более востребованную видимую область. Довольно долгое время коротковолновая граница полупроводниковых лазеров составляла около 630 нм , а самые мощные лазеры работали на длине волны $\sim 670 \text{ нм}$. Поэтому именно красные диоды с длиной волны $\lambda \approx 670 \text{ нм}$ были наиболее популярным выбором для возбуждения красителей. В работах [16, 17, 32–34] была получена генерация вынужденного излучения, но КПД не превышал 2% и, кроме того, генерация осуществлялась все еще в ИК области, $\lambda \approx 730\text{--}780 \text{ нм}$. Особо стоит отметить работу [17], в которой впервые при непрерывной накачке полупроводниковым лазером получена перестройка длины волны в пределах $735\text{--}775 \text{ нм}$, правда, с небольшим КПД (0.5%) в максимуме кривой перестройки.

Существенное улучшение энергетических параметров было продемонстрировано после появления мощных голубых инжекционных InGaN -лазеров с длиной волны излучения $440\text{--}450 \text{ нм}$. В 2015 г. [35] достигнут КПД 9% и дифференциальный КПД 11% при продольной накачке полимерного активного элемента с красителем DCM толщиной 18 мкм двумя мощными лазерными диодами с длиной волны излучения 450 нм и суммарной пиковой мощностью 32 Вт при длительности импульсов 100 нс . Благодаря малой длительности импульсов удалось на порядок увеличить ток через диоды и мощность их излучения, по сравнению с паспортными данными диодов, без их разрушения. Правда, авторы не приводят данных о сроке службы используемых лазерных диодов в таком режиме. На одну поверхность активного элемента было на-

несено многослойное покрытие, хорошо пропускающее излучение накачки и отражающее излучение красителя; это покрытие служило глухим зеркалом. Выходное сферическое зеркало располагалось на некотором расстоянии от активного элемента. Схема резонатора в этой работе не позволяла осуществить перестройку длины волны излучения.

В 2016 г. в работе [36] была получена генерация на растворах восьми красителей при импульсной поперечной накачке тремя голубыми лазерными диодами и использовании резонатора с полным внутренним отражением генерируемого излучения от стенки кюветы с красителем при скользящем падении (рис.3). Для двух веществ достигнуты КПД более 12% . Выбор поперечной схемы накачки был оправдан тем, что используемые лазерные диоды мощностью 3.5 Вт в непрерывном режиме обладали сильной асимметрией выходного излучения. Это излучение невозможно сфокусировать в маленькое пятно, но легко собрать в тонкую полоску, просто отобразив p - n -переход диода на кювету с красителем. Использование резонатора со скользящим падением позволило использовать большие концентрации красителей и малую глубину проникновения излучения накачки в раствор. В результате создавалась высокая концентрация возбужденных молекул красителя и достаточное усиление. Такой резонатор позволял применять селективирующие элементы, и в следующей работе [37] была осуществлена плавная перестройка длины волны излучения в широкой спектральной области на растворах восьми красителей, при этом КПД в максимуме кривой перестройки для двух красителей превышал 5% , что уже давало возможность практического применения.

Практически одновременно в 2017 г. была опубликована работа [38], в которой применен полупроводниковый лазер с длиной волны 445 нм для квазипродольной накачки промышленного струйного лазера на красителе Coherent CR 699-21. С красителем Кумарин 498 и при поглощенной мощности накачки 3.1 Вт в непрерывном режиме получена перестройка длины волны в области $485\text{--}530 \text{ нм}$ при КПД в максимуме кривой перестройки 11% . В другой работе этих авторов [39] область перестройки была расширена в длинноволновую область $530\text{--}575 \text{ нм}$ за счет использования смеси красителей и

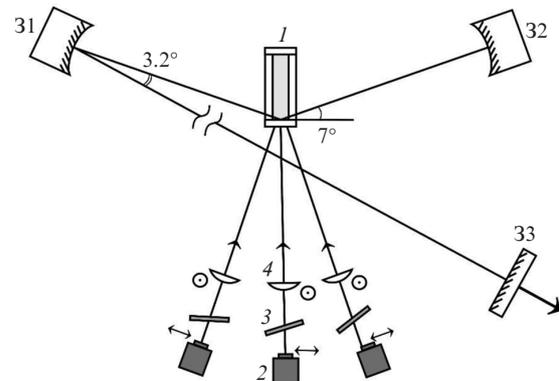


Рис.3. Экспериментальная схема лазера на красителе с поперечной диодной накачкой:

31, 32, 33 – зеркала резонатора; 1 – кювета из плавящего кварца с раствором красителя в бензиловом спирте; 2 – полупроводниковые лазерные диоды 450 нм ; 3 – полуволновые пластинки; 4 – фокусирующие линзы ($f = 53 \text{ мм}$).

передачи энергии от коротковолнового красителя к длинноволновому.

Следующий этап развития лазеров на красителях с диодной накачкой связан с появлением зеленых InGaN-лазеров с длиной волны ~ 520 нм и мощностью 1 Вт (в настоящее время мощность увеличена до 1.6 Вт) в непрерывном режиме. По мощности они уступали голубым лазерным диодам, но превосходили их по качеству излучения за счет меньшей ширины p–n-перехода, что облегчало их применение для продольной накачки. При этом следует учесть, что самые эффективные лазерные красители (родамины, пиррометены) хорошо поглощают зеленое излучение и плохо – голубое. Поэтому появление зеленых диодов позволило использовать самые эффективные красители с высоким КПД и низким порогом генерации.

В работе [40] при накачке двумя диодами с суммарной импульсной мощностью 4 Вт на длине волны ~ 520 нм осуществлена продольная накачка растворов шести красителей. В неселективном резонаторе достигнуты КПД 26% для красителя Пиррометен 567 и 22% для красителя Родамин 6Ж. Использовалась стандартная схема трехзеркального резонатора с перетяжкой на активном элементе и компенсацией астигматизма. При добавлении в резонатор фильтра Лيو для всех красителей получена перестройка длины волны шириной от 27 до 69 нм для разных красителей, а суммарная область, в которой осуществлялась перестройка, составляла 537–682 нм. Максимальный КПД 25% в максимуме кривой перестройки зарегистрирован у Пиррометена 567.

На рис.4 на едином графике приведены сводные результаты работ [37, 40], полученные для эффективных лазерных красителей при поперечной схеме накачки ($\lambda = 445$ нм) и продольной схеме (520 нм) в различных растворителях. Общий диапазон перестройки длины волны генерации составил около 200 нм, $\Delta\lambda \approx 500$ –700 нм. Отметим, что энергия накачки при использовании зеленых лазерных диодов примерно в три раза меньше, чем при накачке синими диодами (0.75 и 2.4 мкДж соответственно). Таким образом, график перестройки демонстрирует более высокую эффективность лазеров на красителях при использовании диодной накачки с длиной волны 520 нм.

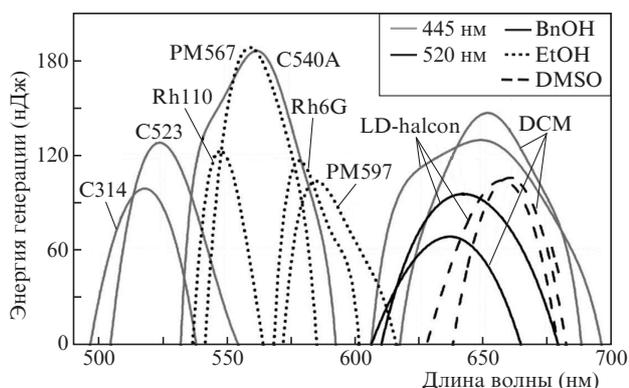


Рис.4. Диапазоны перестройки длины волны генерации для лазеров на красителях с накачкой полупроводниковыми лазерами: поперечная накачка 450 нм с суммарной энергией 2.4 мкДж (серые кривые, [37]); квазипродольная накачка 520 нм с суммарной энергией 0.75 мкДж (чёрные кривые, [40]). Красители растворялись в бензиловом спирте (BnOH, сплошные кривые), этиловом спирте (EtOH, ?пунктир) или диметилсульфоксиде (DMSO, штриховые кривые).

В следующих работах [41, 42] исследовались полимерные образцы, активированные тремя красителями из класса пиррометенов и Родамином 6Ж. На всех красителях получена перестройка длины волны, наилучшие результаты достигнуты для Пиррометена 580: перестройка в области 549–580 нм при КПД в максимуме 13%.

Были предприняты попытки накачать излучением лазерных диодов жидкие кристаллы (ЖК), активированные красителями. В 2021 г. представлена, по-видимому, первая достаточно убедительная демонстрация лазерного эффекта такой системы [43]. В слое нематического ЖК толщиной 10 мкм растворялись красители DCM, Кумарин 504 и Кумарин 540А. Излучение накачки с длиной волны 445 нм и генерируемое лазерное излучение распространялись перпендикулярно слою ЖК. На всех трех красителях была получена генерация вынужденного излучения на длинах волн 610, 480 и 530 нм соответственно с максимальным КПД около 1.5%.

Стоит упомянуть о синхронизации мод в лазере на красителе с накачкой тремя зелеными полупроводниковыми лазерами с длиной волны 513 нм [44]. Использовалась синхронная накачка в комбинации с насыщающимся поглотителем. Лазерные диоды питались цугами импульсов длительностью 1 нс и периодом следования ~ 5 нс, равным времени обхода светом резонатора, длительность цуга составляла 400 нс. При использовании только синхронной накачки без насыщающегося поглотителя или только насыщающегося поглотителя при гладком импульсе накачки за время 400 нс полная синхронизация мод не успевала установиться из-за недостаточного усиления. Увеличивать длительность накачки не представлялось возможным из-за развития термооптических искажений в активном элементе. При одноволновом использовании синхронной накачки и насыщающегося поглотителя за время импульса накачки синхронизация мод успевала установиться и были получены ультракороткие импульсы длительностью ~ 200 пс по полувысоте.

В [45, 46] описан довольно экзотический лазер на красителе, накачиваемый лазерным диодом с длиной волны 450 нм. Активный элемент представляет собой капилляр с внутренним диаметром 0.3 мм, заполненный раствором флуоресцирующего полимера. Накачка осуществляется поперек капилляра, а генерация распространяется по внутренней окружности капилляра в виде так называемых мод шепчущей галереи (whispering-gallery-mode, WGM). К сожалению, авторы этих работ не привели никаких энергетических характеристик, кроме пороговой интенсивности накачки – 0.43 МВт/см² [45] и 0.14 МВт/см² [46], что довольно много для поперечной накачки. Незначительная перестройка длины волны осуществлялась изменением либо концентрации активного вещества [45], либо температуры [46], поскольку при изменении температуры менялся показатель преломления раствора.

В работе [47] описан капиллярный лазер на красителе, поперечно накачиваемый лазерным диодом с длиной волны 440 нм. Однако приведенные в ней рисунки указывают на то, что лазерный эффект не был достигнут, а авторы наблюдали только флуоресценцию.

Основные результаты работ по накачке красителей полупроводниковыми лазерами (в хронологическом порядке) представлены в табл.2. Отметим, что существенный прогресс в диодной накачке как лазеров на красителях, так и других перестраиваемых лазеров произошел во

Табл.2. Результаты исследований по диодной накачке лазеров на красителях, полученные для разных типов лазеров.

Тип лазера	d (мкм)	λ_{pump} (нм)	Схема накачки	λ_{gen} (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	τ_{pump} (нс)	P_{pump} (Вт)	P_{max} или E_{max}	КПД (%)	I_{th} (кВт/см ²)	Ссылка, год
Капиллярный	∅20	820	SP	~985	нет	50	9	0.4 Вт	4.4	4	[14], 1974
Струйный	100	670	LP	758	нет	CW	0.014	0.28 мВт	2.1	0.55	[16], 1993
Струйный	–	670	QLP	735–775	40	CW	0.235	1.4 мВт	0.5	7.2	[17], 1994
Полимерный	2000	671	LP	740	нет	100	3			66	[32], 2003
Полимерный	1600	671	LP	740	нет	230	3			25	[33], 2004
Полимерный		671	QLP	730	нет	200	3	8.8 нДж	1.6	150	[34], 2005
Тонкопленочный	0.18	406		500	нет	50	1.4			1.5	[18], 2006
Тонкопленочный	0.12	409	SP	~626	нет	1	0.67			11	[20], 2006
Полимерный	1.2	441	LP	550	нет	3	0.11			5.1	[22], 2008
Полимерный	0.65	441	LP	563	нет	4	0.32	2.5 мВт	0.8	90	[23], 2008
Тонкопленочный	0.35	~470 LED	SP	568	нет	47				0.22	[28], 2008
Полимерный	2	406	LP	530	нет	3				260	[24], 2009
Полимерный	~2	406	LP	500–540 550–590	~40	2–3				100	[25], 2010
Тонкопленочный	0.2–0.35	445		625–637	12	20	18	2 нДж	0.6		[31], 2012
Тонкопленочный		448 LED		537	нет	~30		3.15 нДж	0.8	0.21	[29], 2013
Тонкопленочный		405 LED		635	нет					0.2	[30], 2013
Полимерный	18	450	LP	625	нет	100	32	280 нДж	9		[35], 2015
		445	SP	563/653	нет	200	12	300 нДж	~12.5	30	[36], 2016
		445	SP	535–603 606–700	68 94	200	12	130 нДж	~5.5		[37], 2017
Струйный		445	QLP	485–530	45	CW	3.1	370 мВт	12	150	[38], 2017
	200	520	QLP	542–584	42	200	3.75	180 нДж	25	300	[40], 2018
Струйный		445	QLP	495–580	85	CW	3.4	370 мВт	11	60	[39], 2019
		445	LP	~630	нет	200	~18	650 нДж	18	23	[48], 2020
Полимерный	100	513	QLP	549–580	31	470	3.75	230 нДж	13	65	[42], 2020
		441	SP	580	нет	9				40	[47], 2021
ЖК	10	445	LP	610	нет	16	3.2	0.25 нДж	~1.5	980	[43], 2021
WGM	∅300	450		543–559*	16*	50				430	[45], 2021
WGM	∅300	450			13**	50				140	[46], 2022

Примечание: d – толщина активного элемента; λ_{pump} – длина волны накачки; схема накачки: поперечная (SP), продольная (LP) и квази-продольная (QLP); λ_{gen} – длина волны генерации; $\Delta\lambda$ – диапазон перестройки; τ_{pump} – длительность импульсов накачки; P_{pump} – импульсная мощность накачки; P_{max} или E_{max} – максимальная мощность или энергия генерации; I_{th} – пороговая интенсивность накачки лазера; * перестройка путем изменения концентрации красителя; ** перестройка путем изменения температуры.

многим благодаря появлению мощных синих (450 нм) и зеленых (520 нм) многомоновых диодов фирмы Nichia.

4. Основные проблемы

Данный раздел посвящен обсуждению методов повышения интенсивности накачки красителей при использовании излучения реальных диодных лазеров.

Как было отмечено выше, основной проблемой диодной накачки лазеров на красителях является трудность

создания достаточной интенсивности излучения накачки. Поэтому остро стоит вопрос уменьшения расходимости излучения полупроводниковых лазеров и объединения пучков от разных лазеров. Уменьшить пассивным образом расходимость по «медленной» оси, не изменяя размер пучка, невозможно, это противоречило бы теореме о сохранении яркости. Если допустимо увеличение размера, то можно пропустить излучение через цилиндрический телескоп или призмный расширитель, при этом уменьшается расходимость. Обычно применяют расширение по медленной оси в 3–6 раз, что в большинстве случаев

позволяет сфокусировать лазерный пучок в пятно меньшего размера.

Объединение совершенно одинаковых пучков также невозможно по термодинамическим соображениям. Но если пучки чем-либо различаются, например поляризацией или длиной волны, то объединение становится возможным. Если различаются длины волн, то можно изготовить многослойное диэлектрическое зеркало с резкой ступенькой в спектре отражения, расположенной между длинами волн пучков. Такое зеркало пропустит один пучок и отразит второй, что позволяет совместить пучки в пространстве. Для лазерных красителей, обладающих широкими спектрами поглощения, не является проблемой их одновременное возбуждение лазерами с различными длинами волн; например, краситель DCM подходит для накачки как синими (450 нм), так и зелеными (520 нм) диодами. Если поляризации пучков перпендикулярны, то их легко объединить с помощью поляризационного делителя (термин неудачный, но общепринятый; пучки, распространяющиеся в обратных направлениях, делитель объединяет). Обычно такие делители изготавливаются в виде кубиков. Описанными способами можно осуществить сведение двух лазерных пучков в один. Если необходимо объединить большее число пучков, то можно применить дифракционную решетку: для этого необходимо, чтобы пучки различались длинами волн. Подбирая для каждой длины волны угол падения так, чтобы в нужном порядке дифрагированные пучки распространялись в одном направлении, можно сводить вместе значительное число лазерных пучков. Этот метод широко применяется в оптоволоконной связи для объединения, а на выходе волокна – для разделения каналов. При этом удается одновременно пропустить по одному волокну 270 сигналов разных частот. Другим эффективным примером применения такой методики является работа [49], в которой дифракционная решетка задает длины волн генерации лазерных диодов, расположенных в линейку, и объединяет пучки излучения этих диодов.

Другой способ объединения более двух пучков в один пучок – использование фильтра Шольца. Для уснения принципа этого метода нужно вспомнить, что если монохроматическое линейно поляризованное излучение направить на кристаллическую пластинку, оптическая ось которой ориентирована под 45° к направлению поляризации излучения, то можно разложить электрический вектор на две компоненты: перпендикулярную и параллельную оптической оси. На некотором расстоянии от входа в пластинку разность фаз между этими компонентами окажется равной $\pi/2$, и поляризация излучения станет круговой. Затем разность фаз станет равной π , и поляризация будет линейной, но ориентированной перпендикулярно исходной поляризации. При разности фаз $2\pi m$, где m – целое число, поляризация возвращается к исходной, а при $2\pi(m + 1/2)$ – повернута на 90° к исходной. Теперь объединим поляризационным делителем два пучка с различающимися поляризациями и длинами волн в один пучок. Затем пропустим его сквозь кристаллическую пластинку, толщина которой подобрана так, чтобы у излучения одной длины волны поляризация повернулась на 90° , а у другой не изменилась. На выходе из пластинки получим пучок, состоящий из двух совпадающих по направлению пучков с различными длинами волн, но одинаковыми направлениями поляризации. Повторяя описанную выше процедуру, можно объединить излуче-

ния от нескольких лазерных диодов, однако их длины волн должны быть различны. Если нельзя подобрать нужную толщину пластинки, можно подстроить длины волн лазерных диодов, например, изменением температуры диодов. Более детальное описание этого метода можно найти в работе [50].

Стоит упомянуть и такой очевидный метод объединения пучков, как сведение в волокно. Ряд фирм предлагает уже готовые лазерные модули с волоконным выходом, например с объединением пучков от 12 мощных диодов при использовании волокна $\varnothing 200$ мкм.

5. Заключение

Таким образом, экспериментально показана возможность эффективной накачки лазеров на красителях современными полупроводниковыми инжекционными лазерами видимого диапазона как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Для самых эффективных красителей продемонстрированы КПД генерации лазерного излучения более 20% как в неселективном резонаторе, так и в режиме перестройки длины волны излучения.

1. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. *УФН*, **72**, 161 (1960).
2. Fork R.L., Greene V.I., Shank C.V. *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 671 (1981).
3. Sizer T., Kafka J., Duling I., Gabel C., Mourou G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 506 (1983).
4. Bernard J.E., Alcock A.J. *Opt. Lett.*, **18**, 968 (1993).
5. Paboeuf D., Mhibik O., Bretenaker F., Goldner P., Parisi D., Tonelli M. *Opt. Lett.*, **36**, 280 (2011).
6. Demirbas U., Li D., Birge J.R., Sennaroglu A., Petrich G.S., Kolodziejski L.A., Kaertner F.X., Fujimoto J.G. *Opt. Express*, **17**, 14374 (2009).
7. Durfee C.G., Storz T., Garlick J., Hill S., Squier J.A., Kirchner M., Taft G., Shea K., Kapteyn H., Murnane M., Backus S. *Opt. Express*, **20**, 13677 (2012).
8. Strotkamp M., Munk A., Jungbluth B., Hoffmann H.-D., Hoffner J. *Proc. International Conf. on Space Optics (ICSO 2018) (город?)*, 2019, pp 160–173.
9. Demirbas U., Uecker R., Klimm D., Sumpf B., Erbert G., in *Advanced Solid State Lasers* (2013). DOI: 10.1364/ASSL.2013.ATu3A.54.
10. Munk A., Jungbluth B., Strotkamp M., Hoffmann H.-D., Poprawe R., Hoffner J., Lübken F.-J. *Opt. Express*, **26**, 14928 (2018).
11. Backus S., Kirchner M., Durfee C., Murnane M., Kapteyn H. *Opt. Express*, **25**, 12469 (2017).
12. Demirbas U., Baali I., Acar D.A.E., Leitenstorfer A. *Opt. Express*, **23**, 8901 (2015).
13. Demirbas U., Acar D.A.E. *J. Opt. Soc. Am. B*, **33**, 2105 (2016).
14. Wang G.T. *Opt. Commun.*, **10**, 149 (1974).
15. Benfey D.P., Brown D.C., Davis S.J., Piper L.G., Foutter R.F. *Appl. Opt.*, **31**, 7034 (1992).
16. Scheps R. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **5**, 1156 (1993).
17. Benfey D.P., Boyd R.E., Brown D.C., Watkins J.C., Kessler W.J., Davis S.J., Otis C.E., Pedulla L.A., in *Visible and UV Lasers*. Ed. by R.Scheps (Los Angeles, California, 1994, pp 204–212).
18. Riedl T., Rabe T., Johannes H.-H., Kowalsky W., Wang J., Weimann T., Hinze P., Nehls B., Farrell T., Scherf U. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 241116 (2006).
19. Riedl T., Rabe T., Görrn P., Wang J., Weimann T., Hinze P., Galbrecht F., Scherf U., Kowalsky W. *Proc. SPIE*, **6655**, 66550V (2007).
20. Vasdekis A.E., Tsiminis G., Ribierre J.-C., O'Faolain L., Krauss T.F., Turnbull G.A., Samuel I.D.W. *Opt. Express*, **14**, 9211 (2006).
21. Vasdekis A.E., Tsiminis G., Amarasinghe D., Ruseckas A., Goossens M., O'Faolain L., Krauss T.F., Turnbull G.A., Samuel I.D.W. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies (город?)*, 2007, paper CTuL3.
22. Sakata H., Takeuchi H. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 113310 (2008).

23. Sakata H., Yamashita K., Takeuchi H., Tomiki M. *Appl. Phys. B*, **92**, 243 (2008).
24. Matsuura H., Fukuda M., Sakata H. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 194 (2009).
25. Fukuda M., Matsuura H., Yamazaki E., Sakata H. *Appl. Opt.*, **49**, 2552 (2010).
26. Шефер Ф.П. *Лазеры на красителях* (М.: Мир, 1976).
27. Thiel E., Zander C., Drexhage K.H. *Opt. Commun.*, **60**, 396 (1986).
28. Yang Y., Turnbull G.A., Samuel I.D.W. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 163306 (2008).
29. Wang Y., Tsiminis G., Kanibolotsky A., Skabara P., Samuel I., Turnbull G. *Opt. Express*, **21**, 14362 (2013).
30. Herrnsdorf J., Wang Y., McKendry J.J.D., Gong Z., Massoubre D., Guilhabert B., Tsiminis G., Turnbull G.A., Samuel I.D.W., Laurand N., Gu E., Dawson M.D. *Laser Photonics Rev.*, **7**, 1065 (2013).
31. Klinkhammer S., Liu X., Huska K., Shen Y., Vanderheiden S., Valouch S., Vannahme C., Bräse S., Mappes T., Lemmer U. *Opt. Express*, **20**, 6357 (2012).
32. Pacheco D.P., Russell W.H., Russell J.A., Tilton R.A., Reilly M., Aldag H.R., in *Solid State Lasers XII*. Ed. by R.Scheps (SPIE, 2003, pp 35–45).
33. Pacheco D.P., Russell W.H., Aldag H.R., in *Solid State Lasers XIII: Technology and Devices*. Ed. by R.Scheps, H.J.Hoffman (SPIE, 2004, pp 180–188).
34. Russell J.A., Pacheco D.P., Aldag H.R., in *Solid State Lasers XIV: Technology and Devices*. Ed. by H.J.Hoffman, R.K.Shori (SPIE, 2005, pp 217–226).
35. Zhao Z., Mhibik O., Nafa M., Chénais S., Forget S. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 51112 (2015).
36. Burdukova O.A., Gorbunkov M.V., Petukhov V.A., Semenov M.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 105004 (2016).
37. Burdukova O., Gorbunkov M., Petukhov V., Semenov M. *Appl. Phys. B*, **123**, 84 (2017).
38. Stefanska D., Suski M., Furmann B. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 45701 (2017).
39. Stefańska D., Suski M., Zygmunt A., Stachera J., Furmann B. *Opt. Laser Technol.*, **120**, 105673 (2019).
40. Burdukova O., Petukhov V., Semenov M. *Appl. Phys. B*, **124**, 188 (2018).
41. Бурдукова О.А., Долотов С.М., Петухов В.А., Семенов М.А. *Квантовая электроника*, **49**, 745 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 745 (2019)].
42. Burdukova O.A., Dolotov S.M., Petukhov V.A., Semenov M.A. *Laser Phys. Lett.*, **17**, 025801 (2020).
43. Brown C.M., Dickinson D.K.E., Hands P.J.W. *Opt. Laser Technol.*, **140**, 107080 (2021).
44. Burdukova O.A., Petukhov V.A., Semenov M.A. *J. Russ. Laser Res.*, **42**, 100 (2021).
45. Niu B., Ge K., Xu Z., Shi X., Guo D., Zhai T. *Polymers (Basel)*, **13**, 205 (2021).
46. Niu B., Shi X., Ge K., Ruan J., Xu Z., Zhang S., Guo D., Zhai T. *Nanoscale Adv.*, **4**, 2153 (2022).
47. Vladev V.P., Todorova M.M., Brazkova M.S., Bozhkov S.I. *Laser Phys. Lett.*, **18**, 115103 (2021).
48. Hamja A., Chénais S., Forget S. *J. Appl. Phys.*, **128**, 015501 (2020).
49. Haas M., Rauch S., Nagel S., Beißwanger R., Dekorsy T., Zimer H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **53**, 1 (2017).
50. Pochechuev M.S., Suvorina A.S., Shcheglov P.A., Nikitin S.P., Zheltikov A.M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35**, 2842 (2018).