

Одиннадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 27 — 30 июня 2011 г.

УДК 53+535+621.375.8

П.Г. Зверев^{1,2}, Б.С. Ринкевичюс¹

¹Московский энергетический институт (технический университет)
Научно-образовательный центр «Оптическая и лазерная диагностика», Россия
111250, Москва, Красноказарменная ул., 17, E-mail: rinkevbs@mail.ru

²Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия,
119991, Москва, ул. Вавилова, 38, E-mail: zverev@lst.gpi.ru

РОЛЬ ЛАЗЕРОВ В РАЗВИТИИ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

Доклад посвящен анализу развития оптических методов исследования потоков, связанных с созданием в 1960 году новых источников когерентного излучения – лазеров. Кратко рассмотрена история разработки первых лазеров, роль отечественных и зарубежных ученых в развитии квантовой электроники. Анализируется возникновение новых оптических методов исследования потоков, обусловленных высоким качеством лазерного излучения: большой плотностью мощности, высокой временной когерентностью (монохроматичностью), пространственной когерентностью (узкой направленностью), степенью поляризации. Исторический анализ базируется как на отечественных и зарубежных оригинальных статьях, так и на аналитических статьях, которые появились в связи с празднованием в 2010 году пятидесятилетия создания лазеров, а также на анализе содержания трудов конференции «Оптические методы исследования потоков» за 1991 – 2009 гг.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРОВ, ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА, ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА,
ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2010 году исполнилось 50 лет лазерной физике, области знаний, связанной с созданием, исследованием и использованием лазеров и лазерных систем. Ее днем рождения по праву можно считать 16 мая 1960 года, когда Т.Г. Мейман, исследуя свечение кристалла рубина, помещенного внутри спиралевидной фотографической лампы-вспышки, при увеличении подводимой электрической мощности впервые зарегистрировал резкое увеличение интенсивности люминесценции и сужение спектральной линии люминесценции [1]. Таким образом, был создан первый в мире лазер или оптический квантовый генератор, основанный на усилении света за счет процессов вынужденного испускания излучения атомными и молекулярными системами.

Создание первого лазера явилось следствием ряда фундаментальных научных результатов и открытий. В 1916 году А. Эйнштейн впервые ввел понятие вынужденного испускания [2]. Это было необходимо для корректного описания состояния атомной системы в условиях термодинамического равновесия с окружающим электромагнитным излучением. В 1927 – 1933 гг. П. Дирак создал квантово-механическую теорию

вынужденного излучения. В дальнейшем, В.А. Фабрикантом было показано, что атомная система, находящаяся в неравновесном состоянии, обладает отрицательным поглощением, что может приводить к усилению электромагнитного излучения. Докторская диссертация на эту тему была защищена В.А. Фабрикантом в ФИАНе в 1939 году [3]. В 1951 году профессор В.А. Фабрикант вместе с сотрудниками Ф.А. Бутаевой и М.М. Вудынским подали заявку на оптический усилитель, основанный на использовании свойств вынужденного излучения [4]. К сожалению, положительное решение по этой заявке было выдано только в 1959 г., а диплом на открытие в 1964 году (рис. 1).



Рис. 1. Диплом на открытие № 12, выданный В.А.Фабриканту, М.М. Вудынскому и Ф.А. Бутаевой с приоритетом от 18 июня 1951 года

Идея о принципиальной возможности создания молекулярного квантового генератора (мазера) была выдвинута Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в 1954 году [5]. Чуть позже американские ученые Дж. Гордон, Х. Цайгер и Ч. Таунс продемонстрировали работу первого в мире лазера [6]. Инверсия населенности в нем создавалась за счет селекции молекул аммиака, находящихся в возбужденном состоянии, и их последующее прохождение через объемный резонатор с собственной частотой 24 ГГц. Следует отметить, что первый лазер работал по двухуровневой схеме. Позднее Н.Г. Басов и А.М. Прохоров предложили использовать оптическое возбуждение для перевода многоуровневой системы в возбужденное состояние [7], этот способ создания инверсии населенности впоследствии получил название метод трех уровней, который лежит в основе работы всех лазеров с оптической накачкой.

Для перехода в оптический диапазон необходимо было решить проблему разработки подходящего резонатора для создания обратной связи в генераторе. Объемные резонаторы, используемые в радиофизике, не могли быть использованы, так как их размеры должны быть сравнимы с длиной волны генерируемого излучения, а в оптическом диапазоне длина волны излучения менее 1 мкм. В [8] А.М. Прохоров предложил использовать в качестве оптического резонатора два плоских зеркала, расположенных параллельно друг другу, которые в дальнейшем были названы открытым резонатором. Несколько позже идея открытого резонатора была подробно теоретически

рассмотрена Ф. Шавловым и Ч. Таунсом [9]. В 1964 году Н. Г. Басову, А.М. Прохорову и Ч. Таунсу «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе» была присуждена Нобелевская премия по физике.

В последние годы был издан ряд публикаций по истории создания первого лазера, о том фундаментальном заделе, который был получен в СССР и других странах в шестидесятых годах на момент создания первого лазера. Можно рекомендовать ознакомиться с обзорными публикациями отечественных [10 – 13] и зарубежных [14, 15] ученых, посвященных этой проблематике.

Начиная с 60-х годов многие университеты, академические и научно-исследовательские институты по всему миру начали проводить исследования в различных областях лазерной физики. Профессор Московского энергетического института В.А. Фабрикант предложил использовать уникальные свойства лазерного излучения: монохроматичность, высокую когерентность, узкую направленность и стабильность параметров для исследования движения частиц в потоках оптически прозрачных сред. В настоящее время для этого используются газовые, жидкостные, твердотельные и полупроводниковые лазеры.

2. ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

2.1. Газовые лазеры. Активной средой газовых лазеров служат газы при низком давлении (от сотых долей до нескольких миллиметров ртутного столба) или их смеси, заполняющие стеклянную трубку с впаянными электродами. Первый газовый лазер на смеси атомов гелия и неона был создан в 1961 году [16]. Дальнейшие работы по улучшению параметров He-Ne лазеров позволили им стать простым и надежным источником получения непрерывного монохроматического излучения на длине волны 632,8 нм (реже 1,15 и 3,39 мкм) с высокой пространственной и временной когерентностью, стабильностью всех параметров.

Особенностью основных газовых лазеров является то, что накачка активной среды в них происходит за счет высоковольтного электрического разряда. Электроны, соударяясь с атомами газа, переводят их в возбужденное энергетическое состояние. Поскольку плотность газов очень мала, длина трубки с активной средой должна быть большой, чтобы активного вещества хватило для получения высокой интенсивности излучения. Выходная мощность промышленных гелий-неоновых лазеров длиной 20 ÷ 200 см варьируется от 1 до 100 мВт на длине волны 632,8 нм.

Большое распространение получили газовые лазеры, работающие на ионах Ag^+ в сине-зеленой области спектра (488 и 514,5 нм), ионах Kr^+ в желто-красной области спектра (568,2 и 647,1 нм), Ne^+ в УФ. Их мощность может достигать сотен ватт в непрерывном режиме генерации.

Молекулярные газовые лазеры работают в ИК-диапазоне и обладают высокой эффективностью (КПД до 25%) и мощностью до десятков кВт в непрерывном режиме и десятков кДж в импульсном. Наиболее распространены лазеры на CO_2 и N_2 , которые широко используются в технологических применениях.

Лазерная генерация получена на парах десятков металлов, которые обладают удобной структурой энергетических уровней для создания инверсной населенности и высоким коэффициентом усиления. Самый известный - лазер на парах меди, который излучает на длинах волн 510,4 и 578,2 нм со средней мощностью свыше 40 Вт.

К газовым лазерам относятся также газодинамические, химические и эксимерные лазеры. Однако, они редко используются в исследованиях потоков.

Несомненными достоинствами газовых лазеров являются высокая энергетическая эффективность, возможность непосредственного преобразования электрической энергии в оптическую в процессе лазерной генерации, возможность работы в непрерывном режиме, высокая монохроматичность и относительная дешевизна активной среды.

2.2. Жидкостные лазеры. Активной средой жидкостных лазеров, или лазеров на красителях служат растворы различных органических соединений [17]. Первые лазеры на красителях появились в конце 60-х годов. Плотность их активного вещества занимает промежуточное место между твердым телом и газом, поэтому они генерируют довольно мощное излучение (десятки Ватт) при сравнительно небольших размерах кюветы с рабочим веществом. Для сохранения работоспособности активной среды, как правило, используют прокачку рабочей жидкости через кювету в процессе работы. Лазеры на красителях работают как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Для их возбуждения используют гармоники излучения неодимового лазера, Ag^+ , Kr^+ , азотный и эксимерный лазеры, лазер на парах меди, а также импульсные газоразрядные лампы.

Выделяют несколько классов красителей: полиметиновые, работающие в красной и ближней ИК области ($700 \div 1500$ нм), ксантеновые, генерирующие излучение в видимой области ($500 \div 700$ нм), кумариновые, генерирующие в сине-зеленой области ($400 \div 500$ нм), сцинтилляторные красители, генерирующие в УФ-диапазоне. В качестве активной среды обычно используется раствор красителя в этиловом или метиловом спирте, этиленгликоле или воде; реже краситель вводится в матрицу из пористого стекла или полимера.

Электронные уровни молекул красителя уширены за счет электрон-фононного взаимодействия, поэтому в жидкостном лазере с неселективным резонатором получается широкополосное излучение с максимумом в центре полосы усиления. Установка дисперсионных элементов (дифракционной решетки, дисперсионной призмы, эталона Фабри-Перо) в резонатор приводит к уменьшению спектральной ширины линии излучения, вплоть до получения одномодовой генерации (рис. 2). Существуют лазеры на красителе с распределенной обратной связью, где резонатор – периодическая структура, создаваемая в самой активной среде.

Наиболее известным является лазер на родамине 6Ж. Его полоса поглощения простирается от 420 до 550 нм, а область генерации 560 – 650 нм. Энергетический КПД лазера на красителе, работающего в импульсном режиме, достигает 30 – 40%, в непрерывном режиме – 5 – 10%.

Широкая полоса усиления лазеров на красителях позволила создать на их основе источники ультракоротких импульсов с длительностью десятки фемтосекунд, что является необходимым условием для получения высокого пространственного разрешения в лазерных системах, используемых для диагностики потоков жидкостей и газов [18].

На рис. 2 приведена оптическая схема импульсного перестраиваемого лазера на красителе, состоящего из дифракционной решетки ДР, интерферометра Фабри-Перо ИФП, оптической системы ОС, красителя и полупрозрачного зеркала З. Поворот ДР приводит к грубой, а поворот ИФП к плавной перестройке длины волны лазера.

В качестве основных достоинств жидкостных лазеров можно выделить высокую плотность рабочих частиц и оптическую однородность, широкие полосы усиления и большой спектр красителей, перекрывающий спектральный диапазон от ближнего УФ до ближней ИК области длин волн, а также возможность получать фемтосекундные лазерные импульсы. Из недостатков можно отметить ограниченную термо- и фотостойкость растворов, что требует периодическую смену раствора, использование систем прокачки.

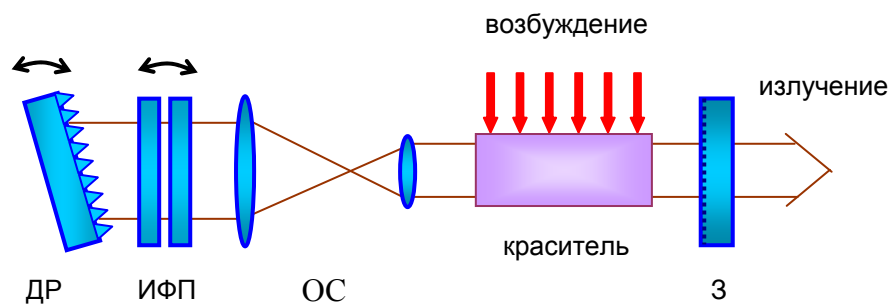


Рис. 2. Оптическая схема импульсного узкополосного перестраиваемого лазера на красителе с поперечной накачкой: ДР – дифракционная решетка, ИФП – интерферометр Фабри-Перо, ОС – оптическая система, З – полупрозрачное зеркало

2.3. Твердотельные лазеры. В твердотельном лазере активной средой являются диэлектрические кристаллы и стекла, активированные ионами редкоземельных элементов или переходных металлов, или диэлектрические кристаллы с собственными точечными дефектами. Инверсная населённость в активной среде твердотельного лазера достигается оптической накачкой при освещении активного элемента газоразрядными лампами или излучением других лазеров, в частности полупроводниковых. Генерация твердотельных лазеров осуществляется по трёх- или по четырёхуровневой схемам.

Первой твердой активной средой был рубин: кристалл Al_2O_3 активированной ионами Cr^{3+} [1]. Лазер работает по трехуровневой схеме, поэтому может излучать только в импульсном режиме и его эффективность составляет доли процентов.

Наиболее распространённым активатором материалов для твердотельных лазеров являются ионы Nd^{3+} . Широко применяемой кристаллической матрицей с Nd^{3+} является кристалл иттрий-алюминиевого граната (ИАГ:Nd^{3+}), который обладает хорошими физическими и оптическими характеристиками [19]. Лазеры на кристалле ИАГ:Nd^{3+} работают в непрерывном, импульсном и импульсно-периодическом режимах. Основная длина волны ИАГ:Nd^{3+} лазера 1064 нм, получена также генерация в области 940, 1300, 1440 нм. Генерация ионов Nd^{3+} получена также в десятках различных кристаллов [20]. Использование другой кристаллической матрицы приводит к изменению спектроскопических характеристик генерационного перехода иона Nd^{3+} , а именно, сечения, спектральной ширины, времени жизни, длины волны, что позволяет выбирать наиболее эффективные материалы для конкретных применений.

Большое соотношение ширины контура усиления и частоты межмодового расстояния ($c/2l$) позволяет достаточно просто осуществлять режим синхронизации мод и получать сверхкороткие импульсы длительностью $1 \div 10$ пс, ограниченные обратной шириной линии усиления.

В последнее время твердотельные активные среды успешно используются в перестраиваемых лазерах. Кристалл корунда с титаном ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ti}^{3+}$) обеспечивает перестраиваемую генерацию в области $700 \div 1024$ нм. Кристалл хром-форстерит ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4 - \text{Cr}^{4+}$) дает плавно перестраиваемое излучение в ближней ИК области $1160 \div 1350$ нм. Современные кристаллы фторида лития дают генерацию в области $840 \div 1100$ нм для F_2^+ центров окраски и $1080 \div 1300$ нм для F_2^- . Короткое время жизни возбуждённых состояний при комнатной температуре делает малоэффективной ламповую накачку этих лазеров. Поэтому накачка, как правило, осуществляется импульсами первой или второй гармоник неодимового лазера. При этом энергетическая эффективность преобразования достигает десятков процентов.

Активные среды перестраиваемых лазеров являются основой современных фемтосекундных лазеров. Сверхширокие полосы усиления позволяют получать лазерные импульсы длительностью десятки в фемтосекунд. Типичная схема фемтосекундного

лазера на титан-сапфире представлена на рис. 3. Модуляция добротности происходит за счет эффекта Керра в самой активной лазерной среде. Призмы ПК необходимы для компенсации временного расплывания фемтосекундных импульсов за счет дисперсии в резонаторе.

Развитие полупроводниковых лазеров повышением их КПД сделало перспективным их использование для накачки твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры на основе монокристаллов арсенида галлия при изменении их примесного состава позволяют получать генерацию в области $750 \div 1000$ нм, что дает им возможность эффективно возбуждать генерацию на ионах Nd^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} и Yb^{3+} . Накачка излучением полупроводниковых лазеров является близкой к резонансной, что во многом снимает проблему наведенных термических искажений в активной элементу и позволяет относительно легко достигать предельно высокой направленности лазерного излучения. Получена непрерывная генерация на ионах Ho^{3+} ($\lambda_r = 2,1$ мкм), Tm^{3+} ($\lambda_r = 2,3$ мкм), Er^{3+} ($\lambda_r = 2,9$ мкм), а также на различных переходах ионов Nd^{3+} . Порог генерации по мощности накачки в некоторых случаях составляет единицы милливатт. Общий КПД неодимового непрерывного лазера с накачкой излучением полупроводникового лазера на длине волны генерации 1,06 мкм достигает 20%.

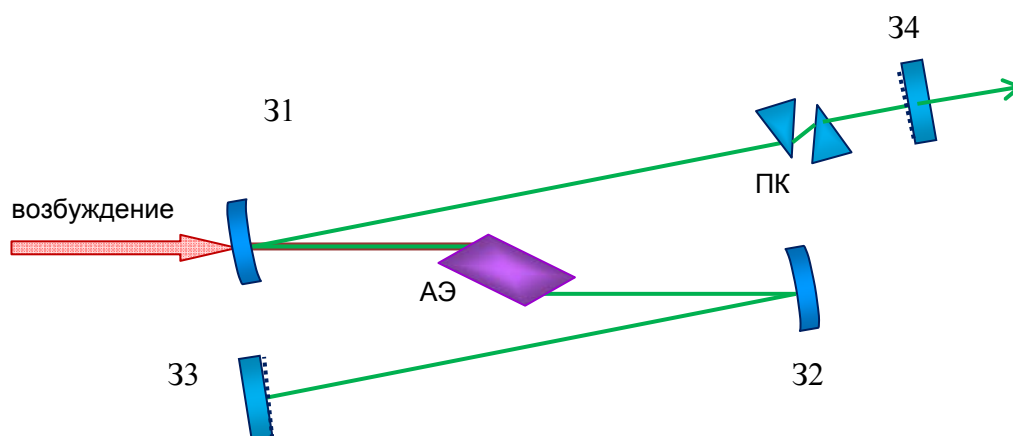


Рис. 3. Оптическая схема фемтосекундного лазера на титан-сапфире: АЭ – активный элемент, ПК - призмный компенсатор, 31 и 32 – поворотные зеркала, 33 и 34 – резонаторные зеркала

Современные твердотельные лазеры с накачкой диодным лазером совмещают в себе достоинства твердотельного и полупроводникового лазеров. По сути, активная среда является эффективным концентратором излучения полупроводникового лазера по спектру, во времени и в пространстве. На рис. 4 представлена оптическая схема лазерной указки, которая совмещает в себе генерацию высокоэффективного $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ лазера с накачкой лазерным диодом и внутрирезонаторное удвоение частоты лазера в кристалле КТР. Суммарная эффективность устройства достигает 20%. Использование активных и нелинейных элементов размером 5 – 10 мм приводит к компактности всего устройства в целом. Вместе с двумя батарейками вся конструкция легко умещается в размер стандартной авторучки. Указка излучает зеленый пучок.

Синие лазерные указки имеют схожий с зелёными лазерными указками принцип работы. Длина волны 473 нм получается путем удвоения частоты лазерного излучения с длиной волны 946 нм. Для получения излучения на длине волны 946 нм используется генерационный переход ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ в кристалле алюмо-иттриевого граната с ионами неодима ($\text{ИАГ}:\text{Nd}^{3+}$). Лазер работает по трехуровневой схеме, поэтому его КПД около 3%.

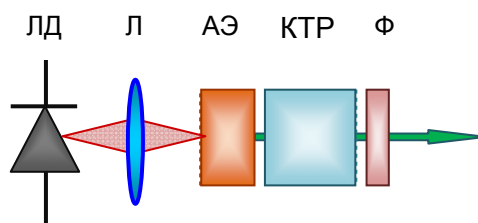


Рис. 4. Схема зеленой лазерной указки: ЛД – полупроводниковый лазерный диод (808 нм → 1064 нм), Л – линза, АЭ – кристалл $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с напыленным входным зеркалом, КТР – кристалл КТР для внутриврезонаторного удвоения частоты лазера (1064 нм → 532 нм) с напыленным оптимальным выходным зеркалом, Ф – фильтр для поглощения ИК излучения

Несомненными достоинствами твердотельных лазеров является большой спектр примесных ионов редкоземельных и переходных металлов, которые позволяют получать лазерное излучение на различных длинах волн оптического диапазона; возможность получения излучения большой мощности, с различными временными и пространственными параметрами. Твердотельные лазеры компактны и технологичны, что дает возможность их встраивать в современные лазерные системы. Из недостатков можно отметить ограниченную лучевую стойкость активных элементов твердотельных лазеров и высокую стоимость их изготовления.

2.4. Полупроводниковые лазеры. Теоретическое обоснование работы лазеров на полупроводниковых кристаллах Н.Г.Басов с сотрудниками предложил еще в 1959 [21]. Позднее ими был предложен механизм инжекции носителей тока через p-n переход [22]. В 1962 году американскими учеными был запущен первый полупроводниковый лазер на кристалле GaAs [23]. Активной средой полупроводниковых лазеров служат полупроводниковые кристаллы (GaAs, InSb, и др.). В отличие от всех других активных сред, полупроводники имеют довольно широкие энергетические зоны; их излучение происходит в широком диапазоне длин волн и обладает малой когерентностью. В активной среде движутся либо избыточные электроны (*n*-проводимость), либо дырки, их нехватка (*p*-проводимость). При их рекомбинации в слое *p-n*-перехода энергия электрического тока непосредственно преобразуется в излучение. Первые полупроводниковые лазеры работали при криогенных температурах. Возбуждение полупроводниковых лазеров может происходить пучками быстрых электронов и оптической накачкой, однако наибольший интерес представляет прямое возбуждением электрическим током.

В 1970 году группой Ж.И. Алферова был показан первый полупроводниковый лазер на основе гетероструктуры, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре [24]. В этих устройствах, слой материала с более узкой запрещенной зоной располагается между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной (рис. 5). Локализация электрон-дырочных пар и их рекомбинация происходит в узком слое полупроводника GaAs. Чаще всего для реализации лазера на основе двойной гетероструктуры используют GaAs и AlGaAs. Преимущество лазеров с двойной гетероструктурой состоит в том, что активная область лазера, в которой находятся электроны и дырки заключена в тонком среднем слое. Это приводит к сильной локализации электронно-дырочных пар и, соответственно, резкому увеличению коэффициента усиления. Периферийная область обладает низким усилением, так как там находится небольшое количество электронно-дырочных пар. Дополнительно, свет отражается от самих гетеропереходов, что приводит к локализации излучения в области максимально эффективного усиления. В 2000 году Ж.И. Алферову, Г. Кремеру и Д. Килби «за развитие полупроводниковых гетероструктур, применяемых в скоростной и оптоэлектронике» была присуждена Нобелевская премия по физике.

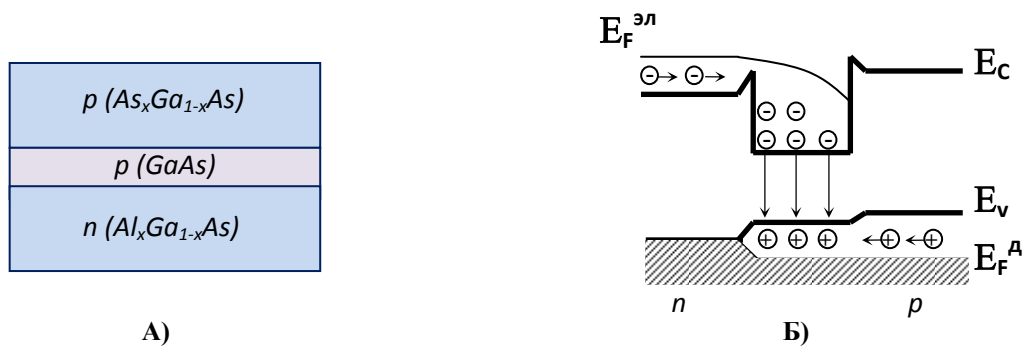


Рис. 5. Устройство лазера на двойном гетеропереходе (А) и его энергетическая схема (Б): $\varepsilon_f^э$ – энергия Ферми для электронов, ε_c – энергия проводимости, ε_v – энергия валентной зоны, $\varepsilon_f^д$ – энергия Ферми для дырок

Широкий набор современных полупроводниковых материалов дает возможность получать излучение лазерных диодов в диапазоне длин волн от 0,3 до 40 мкм. Лазеры разных типов работают как в непрерывном, так и в импульсном режиме, мощность их излучения составляет от долей мВт до единиц МВт (для импульсного режима). Полупроводниковый лазер с прямой электрической накачкой имеет энергетическую эффективность более 50%, а коэффициент усиления достигает 10^4 см^{-1} , что позволяет создать лазер с объемом активной области от 10^{-3} до 1 мм^3 . Малая толщина активной области и волноводный характер распространения излучения в ней приводит к большой расходимости полупроводникового лазера, которая достигает 40° . Для коррекции расходимости в процессе изготовления лазерного диода к полупроводниковому кристаллу приклеивают корректирующую линзу. В последнее время мощные лазерные диоды изготавливаются с волоконным выводом излучения, при этом входной торец волокна закрепляется вплотную в активной области диода, что позволяет собирать до 90% излучения лазера.

Основными достоинствами современных полупроводниковых лазеров является прямая накачка электрическими током, приводящая к высокой энергетической эффективности лазеров, возможность создания очень компактных оптоэлектронных устройств, работа в широком спектральном диапазоне. Из недостатков можно отметить низкую лучевую стойкость полупроводниковых материалов, низкая спектральная стабильность лазерного излучения, необходимость температурной стабилизации активной среды и проблему отвода тепловой энергии из очень маленького объема активной среды.

Подводя итог, можно сказать, что в настоящее время имеется обширный набор лазеров с широким спектром характеристик: от непрерывных до фемтосекундных с мощностью излучения от 1 мВт до 100 Вт в непрерывном режиме.

3. ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ

3.1. Лазерная доплеровская анемометрия [24-32]. Инициатором создания и применения данного метода исследования потоков в нашей стране был проф. В.А. Фабрикант. Первым успешным применением газовых лазеров для исследования потоков жидкости и газа была лазерная доплеровская анемометрия. Суть данного метода измерения локальных скоростей потоков жидкости и газа, содержащих мелкие частицы, сводится к следующему. Его основу составляет хорошо известный эффект Доплера, т.е. изменение частоты рассеянного движущейся частицей лазерного излучения. В этом методе исследуемый поток, содержащий мелкие частицы, зондируется лазерным пучком, рассеянное движущимися частицами лазерное излучение смешивается на фотоприемнике с частью зондирующего пучка в результате чего оказывается, что фототок изменяется во времени с разностной частотой. На практике широкое применение нашла дифференциальная схема измерений скорости частиц, в которой поток зондируется двумя

лазерными пучками, а рассеянное излучение регистрируется в произвольном направлении [25]. Достоинство данной схемы заключается в ее простоте настройки и визуализации области измерения скорости потока. Доплеровский метод измерения скорости различных потоков нашел широкое распространение и отражен во многих статьях, монографиях и книгах, например, [28 – 32]. Ряд фирм серийно выпускают лазерные доплеровские анемометры.

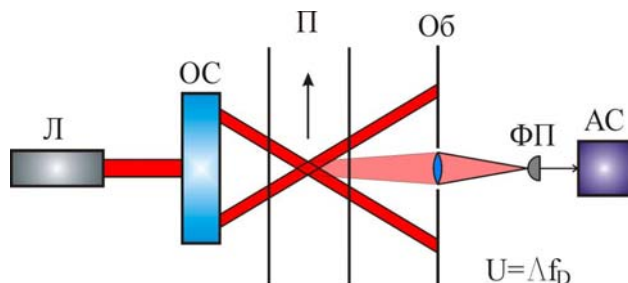


Рис. 6. Схема лазерного доплеровского анемометра: Л – лазер, ОС – оптическая система, П – поток жидкости или газа с частицами, Об – объектив, ФП – фотоприемник, АС – анализатор сигнала, U – скорость потока, λ – масштабный коэффициент, f_D – частота доплеровского сигнала

3.2. Лазерная фазово-доплеровская анемометрия. Детальный анализ закономерностей рассеяния лазерного излучения сферическими частицами показал, что путем усложнения оптической схемы ЛДА, т.е. путем добавления нового канала регистрации рассеянного излучения можно измерять не только скорости, но и размеры частиц [33].

3.3. Лазерная анемометрия по изображениям частиц. Суть данного метода измерения поля скоростей потоков газа, жидкости и пылевой плазмы заключается в следующем [34]. В исследуемый поток вводятся мелкие частицы, полностью им увлекаемые. Поток зондируется двумя короткими лазерными импульсами с заданным интервалом между ними. Лазерный пучок имеет форму вытянутого эллипса. Рассеянное излучение регистрируется матричным фотоприемником. Полученное изображение частиц представляет собой сдвоенное изображение частиц, расстояние между которыми определяется скоростью движения частиц, интервалом между лазерными импульсами и увеличением оптической системы. Для реализации данного метода используются два импульсных лазера, оптическая система формирования плоского лазерного пучка, матричный фотоприемник, компьютер и программное обеспечение. Выпускаются серийные измерительные системы.

Схема экспериментальной установки, реализующей данный метод, показана на рис. 7. Излучение двухимпульсной лазерной системы Л оптической системой ОС преобразуется в лазерную плоскость, которая направляется в поток с мелкими частицами, изображение которых регистрируется. Обработка изображений частиц в потоке позволяет получить его поле скоростей в выбранном сечении.

3.4. КАРС спектроскопия [35]. КАРС спектроскопия – когерентное антистоксовское рассеяние света является совершенно новым методом исследования газовых потоков, основанным на регистрации комбинационного спектра рассеяния лазерного излучения на молекулах газа в антистоксовской области спектра. Данный метод позволяет определять локальную температуру газа. В экспериментах для возбуждения комбинационного рассеяния в различных газах используются импульсные лазеры с длительностью до 10^{-8} с, и интерферометр Фабри-Перо в качестве спектрального прибора [35].

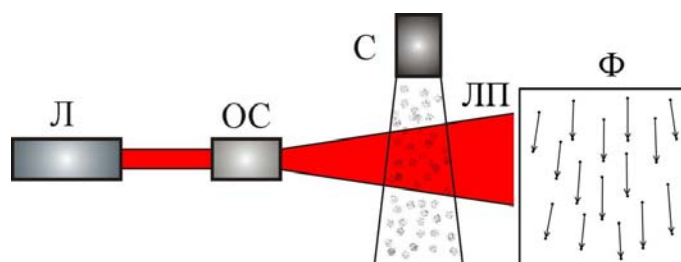


Рис.7. Принципиальная схема лазерного анемометра по изображениям частиц:
 Л - двухимпульсный лазер, ОС – оптическая система формирования лазерной плоскости,
 ЛП – лазерная плоскость, С – газовая струя, Ф – изображение поля скоростей в струе

3.5. Лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ) [36]. Метод ЛИФ позволяет визуализировать характер движения двухфазных потоков. Суть метода заключается в следующем. В рабочую жидкость добавляется флуоресцентный краситель. Исследуемый поток зондируется плоским лазерным пучком с определенной длиной волны. Молекулы красителя, попадающие в лазерный пучок, поглощают падающее на них излучение и затем излучают с другой длиной волны. Именно это излучение и регистрируется цифровой видеокамерой. Регистрация рассеянного излучения через светофильтр позволяет регистрировать только частицы жидкости, содержащие краситель. В экспериментах используются, в основном, перестраиваемые по частоте жидкостные лазеры.

3.6. Голографическая и спекл интерферометрия [37]. Этот вид интерферометрии появился только после создания лазеров, как источников когерентного излучения. Здесь наиболее существенна пространственная когерентность излучения лазера. Голографический метод исследования двухфазных потоков позволяет получить пространственное распределение частиц в объеме.

3.7. Лазерная локация атмосферы [38]. Суть данного метода локации атмосферы состоит в регистрации рассеянного частицами лазерного импульса. В этом методе используются импульсные лазеры, работающие в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Доплеровские лидары позволяют определять скорость и направление движения аэрозольных частиц.

3.8. Лазерная интерферометрия сферических частиц [39]. Данный метод предназначен для дистанционного определения размера прозрачных сферических капель жидкости в воздухе или газовых пузырьков в прозрачной жидкости. Метод основан на наблюдении интерференции лучей лазерного излучения, отраженных от поверхности сферической частицы и преломленных в ней.

3.9. Лазерная рефрактография (ЛР) [40 – 41]. Лазерная рефрактография является современным методом исследования оптически неоднородных потоков, основанным на зондировании среды структурированным лазерным излучением (СЛИ), цифровой регистрации рефракционной картины (рефрактограммы) и ее компьютерной обработке с целью восстановления параметров среды [40]. В лазерной рефрактографии используется структурированное лазерное излучение, формируемое с помощью специальных оптических элементов непосредственно на выходе источника излучения. Такой способ формирования СЛИ дает возможность сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков, что позволяет использовать для описания СЛИ представления геометрической оптики (ГО) и оптики лазерных пучков. В рамках ГО модель СЛИ может быть представлена семействами лучей, образующих поверхности в виде дискретного набора плоскостей, вложенных цилиндров, конусов и др. СЛИ,

прошедшее через неоднородность проецируется на экран в плоскости наблюдения, образуя так называемую 2D-рефрактограмму. Высокая интенсивность СЛИ позволяет наблюдение в рассеянном излучении 3D-рефрактограмм, т.е. поверхностей, образованных рефрагирующими геометрооптическими лучами. На рис. 8 показана принципиальная схема лазерного рефрактографа. Она состоит из лазера Л, оптической системы формирования структурированного лазерного пучка ОС, исследуемой оптически неоднородной среды ОНС, полупрозрачного экрана Э, на котором наблюдается двумерная рефрактограмма Р. Эта рефрактограмма регистрируется с помощью цифровой камеры и обрабатывается с целью решения обратной задачи: определения параметров оптически неоднородной среды.

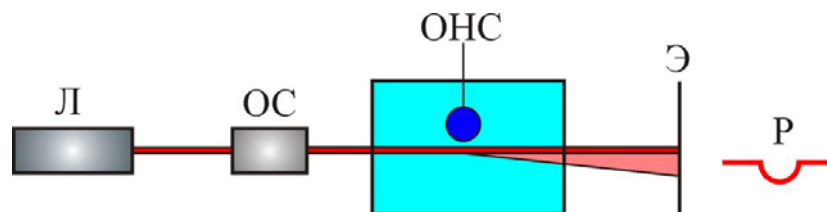


Рис. 8. Принципиальная схема лазерного рефрактографа: Л - лазер, ОС – оптическая система формирования структурированного лазерного пучка, ОНС – оптически неоднородная среда, Э – экран, Р – рефрактограмма

На рис. 9 показаны две лазерные 3D-рефрактограммы для плоского (а) и цилиндрического пучков (б), проходящих под горячим шаром в холодной воде.

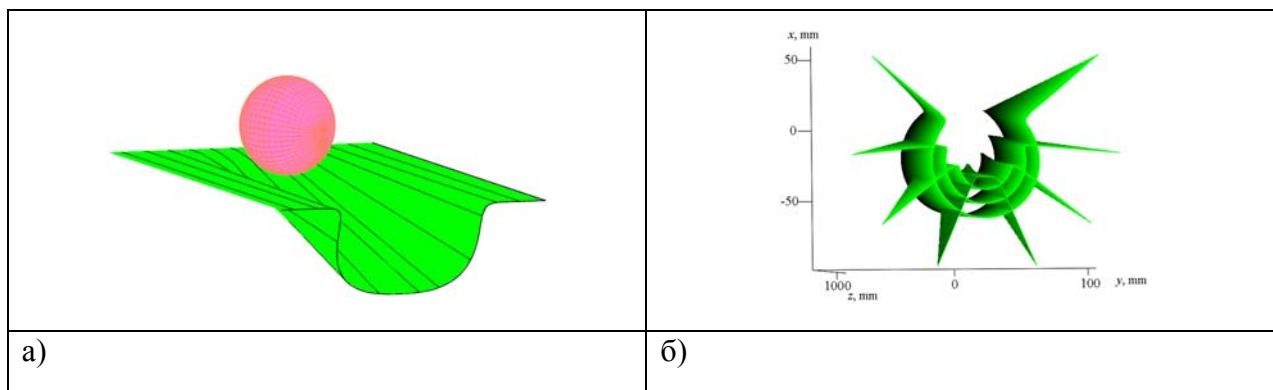


Рис. 9. Лазерные 3D-рефрактограммы для плоского пучка (а) и цилиндрического пучка (б), проходящих под горячим шаром в холодной воде

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление лазеров в 1960 году явилось логическим завершением работы многих ученых физиков по исследованию вынужденного излучения и его применения для создания новых источников излучения .

В современных оптических методах исследования потоков жидкости, газа и плазмы используются, в основном, лазерные источники, обладающие высоким качеством излучения: большой плотностью мощности, монохроматичностью, узкой направленностью и высокой степенью поляризации.

Лазеры позволили создать новые методы исследования потоков: лазерную доплеровскую анемометрию, лазерную фазово-доплеровскую анемометрию, лазерную индуцированную флуоресценцию, анемометрию по изображениям частиц, голографическую и спекл интерферометрию, интерферометрию сферических частиц, КАРС спектрометрию, лазерное зондирование атмосферы, лазерную рефрактографию.

Современные измерительные системы диагностики потоков, использующие лазерное излучение, цифровую регистрацию этого излучения и компьютерную обработку информации являются основой высоких технологий.

Использование структурированного лазерного излучения по амплитуде, фазе и поляризации является основой создания новых лазерных методов исследования потоков.

Поскольку в оптических методах длина волны излучения в среде входит как один из основных параметров, определяющих измеряемый параметр потока, то дальнейшее расширение областей применения оптических методов ограничивается недостаточным знанием зависимости показателя преломления среды от различных физических факторов: химического состава, температуры, давления, электрического и магнитного полей, радиации и т.д.

5. БЛАГОДАРНОСТИ. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты ГК № 02.740.11.0449 и ГК-14.740.11.0594).

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Maiman Th.** Stimulated optical radiation in Ruby // Nature, 1960, v.187, 493-494.
2. **Einstein A.** // Deutsche Phys. Gesellschaft Verhandl. 1916, v.48, p.318; Phys. Gesellschaft Zurich Mitteil. 1916, v.18, p.47 [А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. 3, М., Наука, 1966, с. 386, 393].
3. **Фабрикант В.А.** К вопросу об экспериментальном доказательстве существования отрицательной абсорбции // Труды ВЭИ, 1940, т.41, с. 273-274.
4. **Фабрикант В.А., Вудынский М.М., Бутаева Ф.А.** Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн). Авторское свидетельство № 123209, приоритет от 18.06.1951, Бюлл. Изобр. № 20, 1959.
5. **Басов Н.Г., Прохоров А.М.** Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул // ЖЭТФ, 1954, т.27, с. 431-438.
6. **Gordon J.P., Zeiger H.J., Townes C.H.** Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH₃ // Phys. Rev., 1954, v.95, p.282-284.
7. **Басов Н.Г., Прохоров А.М.** О возможных методах получения активных молекул для молекулярного генератора // ЖЭТФ, 1955, т.28, с. 249-250.
8. **Прохоров А.М.** О молекулярном усилителе и генераторе на субмиллиметровых волнах // ЖЭТФ, 1958, т.34, с.1658-1659.
9. **Schawlow A.L., Townes C.H.** Infrared and Optical Masers // Phys. Rev. 1958, v.112, p.1940.
10. **Крохин О.Н.** 50 лет назад был создан первый лазер // Вестник РАН, 2010, т.80, №10, с. 890-898.
11. **Щербаков И.А.** К истории создания лазера // УФН, 2011, т.181, №1, с. 71-78.
12. **Karlov N.V., Krokhin O.N., Lukishova S.G.** History of quantum electronics at the Moscow Lebedev and General Physics Institutes: Nikolaj Basov and Alexander Prokhorov // Appl. Optics, 2010, v.49, №25, p.F32-F46.
13. **Ринкевичюс Б.С.** Он опередил время. / В кн. Как это было. Воспоминания создателей отечественной лазерной техники. Ч. 3. / Под. ред. И.Б. Ковша. М.: Лазерная ассоциация, 2011.
14. **Bertolotti M.** 50th anniversary of the laser // J. of the European Opt. Soc., 2010, v.5, p.10042S.
15. **Hecht J.** Short history of laser development // Opt. Eng., 2010, v.49, p. 091002, Appl. Optics, 2010, v.49, №25, p.F100.
16. **Javan A., Bennett W.B., Herriott D.R.** Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing He-Ne mixture // Phys. Rev. Lett. 1961, v.6, p.106-110.
17. **Анохов С.П., Марусий Т.Я., Соскин М.С.** Перестраиваемые лазеры // М. Радио и связь, 1982, 360 с.
18. **Херман И., Вильгельми Б.,** Лазеры сверхкоротких световых импульсов, пер. с нем., М., 1986.

19. **Зверев Г.М., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А., Шокин А.А.** Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / М.: Радио и Связь, 1985, 144 с.
20. **Barnes N.P.** Solid state lasers from an efficiency perspective // IEEE J. of Sel. Top. In Quantum Electr., 2007, v.13, no.3, 435-447.
21. **Басов Н.Г., Вул Б.М., Попов Ю.М.** Квантовомеханические полупроводниковые генераторы и усилители электромагнитных колебаний // ЖЭТФ, 1959, т. 37, С. 587-588.
22. **Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М.** Получение состояний с отрицательной температурой в р-п переходах вырожденных полупроводников // ЖЭТФ, 1961, т.40, С. 1879.
23. **Hall R.N., Fenner G.E., Kingsley J.D., Soltys T.J., Carlson R.O.** Coherent light emission from GaAs junctions // Phys Rev. Lett., 1962, vol. 9, p.366-368.
24. **Алферов Ж.И.** Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // УФН, 2002, т. 172, с. 1068-1086.
25. **Yeh Y., Cummins H.** Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer. //Appl. Phys. Lett.1964, Vol.4, Pp.176-178.
26. **Ринкевичюс Б.С.** Применение ОКГ для определения скорости частиц в двухфазной струе методом гетеродинамирования.// Радиотехника и электроника,1969, т. 14, №10, С. 1903-1905.
27. **Аменицкий А.Н., Ринкевичюс Б.С., Фабрикант В.А.** Измерение скоростей в пленках жидкости с помощью ОКГ. // ТВТ, 1969, Т.7, №5, С.1039-1041.
28. **Ринкевичюс Б.С.** Доплеровский метод измерения локальных скоростей с помощью лазера. //УФН,1973, Т.111.Вып.2. С.305-330.
29. **Лазерные доплеровские измерители скорости.** /Ю.В.Василенко, Ю.Н. Дубнищев, В.П. Коронкевич и др. Новосибирск: Наука, 1975.
30. **Durrani T.S., Greated C.A.** Laser systems in flow measurement. New York: Plenum Press, 1977.
31. **Ринкевичюс Б.С.** Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1978, 160 с.
32. **Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982, 304 с.
33. **Дубнищев Ю.Н.** Лазерные доплеровские измерительные технологии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 416 с.
34. **Albrecht H.E., Borys M., Damachke N., Tropea C.** Laser Doppler Measurement Techniques. Berlin: Springer-Verlag, 2003,738 p.
35. **Raffel M., Willert C., Kompenhans J.** Particle Image velocimetry. Berlin: Springer-Verlag, 1998, 253 p.
36. Single-shot high-resolution dual-broadband CARS interferometric lineshape spectroscopy./К.А.Vereschagin, V.V. Smirnov, O.M.Stelmakh et.al. //J.Raman Spectrosc., 2005, Vol.36, p.134 31.
37. **Дулин В.М., Маркович Д.М., Первунин К.С.** Новая методика визуализации пузырей, основанная на подходе лазерно-индуцированной флуоресценции./В кн. Оптические методы исследования потоков: Труды X Юбилейной Международной научно-технической конференции/ Под ред. Ю.Н.Дубнищева, Б.С. Ринкевичюса. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 576 с.
38. **Гинзбург В.М., Степанов Б.М.** Голографические измерения. М.: Радио и связь,1981. 295 с.
39. **Зуев В.Е., Зуев Е.В.** Лазерное зондирование атмосферы.1992.
40. **Михалев А.С.** Оптико-электронный комплекс одновременного измерения параметров движущихся пузырьков газа или капель жидкости. Автореферат канд. диссертации. М.:2009
41. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. Физматлит, 2008, 176 с.
42. **Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L.** Laser refractography. New York: Springer, 2011. 201 p. 157 illus.67 in color. ISBN 978-1-4419-7396-2

P.G. Zverev^{1,2}, B.S. Rinkevichyus¹

¹ *Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: : rinkevbs@mail.ru*

² *A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Russia,
119991, Moscow, Vavilov str., 38, E-mail: zverev@lst.gpi.ru*

LASER IMPACT IN THE OPTICAL METHOD DEVELOPMENT OF LIQUID, GAS AND PLASMA FLOW INVESTIGATION

This report presents the analysis of the optical method development of flow investigation since the invention of lasers in 1960. The history of the first laser development and the contribution of national and foreign scientists to quantum electronics are described. New optical methods of flow investigation were proposed due to high quality of laser radiation: high intensity density, high temporal coherence (monochromaticity), spatial coherence (small divergence), polarization degree. The historical analysis is based on the original and review articles that were published due to the 50th anniversary of laser invention and analysis of the Proceedings of «Optical methods of flow investigation» conference in 1991 – 2009.

HISTORY OF LASER INVENTION, LASER PHYSICS, OPTICAL METHODS OF FLOW INVESTIGATION