

LASERS AND THEIR APPLICATIONS

M. F. SEM

A brief historical essay of the origin of quantum electronics and the creation of lasers is presented. Design of lasers, their operating conditions, and the radiation parameters achievable in various conditions are considered. The properties of laser radiation and the main fields of laser applications are also discussed.

Приведен краткий исторический очерк возникновения квантовой электроники и создания лазеров. Рассмотрены устройство лазеров, режимы их работы, параметры излучения, достигаемые в различных режимах. Обсуждаются свойства лазерного излучения и основные области применения лазеров.

ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

М. Ф. СЭМ

Ростовский государственный университет, Ростов-на-Дону

ВВЕДЕНИЕ

Лазеры — это генераторы и усилители когерентного излучения в оптическом диапазоне,¹ действие которых основано на индуцированном (вызванном полем световой волны) излучении квантовых систем — атомов, ионов, молекул, находящихся в состояниях, существенно отличных от термодинамического равновесия. Лазеры, как и мазеры, генераторы и усилители СВЧ диапазона, называют еще квантовыми генераторами (усилителями), поскольку поведение участвующих в их работе частиц описывается законами квантовой механики. Принципиальным отличием лазеров от всех других источников света (тепловых, газоразрядных и др.), представляющих собой по сути дела источники оптического шума, является высокая степень когерентности лазерного излучения. С созданием лазеров в оптическом диапазоне появились источники излучения, аналогичные привычным в радиодиапазоне генераторам когерентных сигналов, способные успешно использоваться для целей связи и передачи информации, а по многим своим свойствам — направленности излучения, полосе передаваемых частот, низкому уровню шумов, концентрации энергии во времени и т.д. — превосходящие классические устройства радиодиапазона.

Отметим, что высокая степень когерентности достигается за счет того, что лазерное излучение получается именно за счет индуцированных полем световой волны переходов с одного (верхнего) уровня квантовой системы на другой (нижний), при которых излучение каждой микрочастицы когерентно с вызвавшей его волной, а следовательно, излучение всех частиц когерентно между собой. Во всех других источниках света излучение рождается за счет спонтанных, случайных и некоррелированных между собой переходов микрочастиц, и поэтому его когерентность крайне низка.

Понятие об индуцированном излучении было введено в физику А. Эйнштейном в 1916 году, он же предсказал когерентность вынуждающему излучению, которая была позже (1929 год) строго обоснована Дираком в созданной им квантовой теории излучения. Первая попытка экспериментально обнаружить индуцированное излучение относится, очевидно, к 1928 году, когда Ланденбург, изучая

¹ Слова ЛАЗЕР и МАЗЕР (квантовый генератор или усилитель СВЧ диапазона) образованы из начальных букв английской фразы Light (Microwave) Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает: усиление света (СВЧ волн) за счет индуцированного излучения.

отрицательную дисперсию света, сформулировал условия обнаружения индуцированного излучения как преобладание его над поглощением (условие инверсии), отметив, что для этого необходимо специальное избирательное возбуждение квантовой системы.

В 1939 году советский физик В.А. Фабрикант, изучавший отрицательное поглощение в газах, указал на возможность усиления света за счет индуцированного излучения как на способ обнаружения этого излучения.

Несмотря на важность сделанных в этих работах выводов, они, к сожалению, остались практически незамеченными и не оказали существенного влияния на создание лазеров, как и поданная В.А. Фабрикантом с сотрудниками в 1951 году заявка на изобретение “нового способа усиления электромагнитного излучения УФ, видимого, ИК и радиодиапазонов”, которая была опубликована только в 1959 году, уже после создания мазеров и публикаций другими учеными предложений о создании лазеров [1].

Хотя, как следует из изложенного выше, основные понятия квантовой электроники (об индуцированном излучении, инверсии, возможности усиления за счет индуцированного излучения) были сформулированы уже к 1940 году применительно к оптике, создание квантовых приборов шло от мазеров к лазерам, от радиодиапазона к оптическому. То, что первые квантовые приборы появились в радиодиапазоне (СВЧ), связано с тем, что классическая радиофизика не могла решить традиционными для нее методами ряд очень важных с практической точки зрения проблем, таких, как освоение более коротких волн, создание в коротковолновом диапазоне высокостабильных, малощумящих и достаточно мощных приборов. Это настоятельно заставляло искать другой подход к решению этих проблем и привело к созданию в СВЧ-диапазоне принципиально новых приборов – квантовых усилителей и генераторов.

Первый квантовый генератор, работающий на переходе молекулы аммиака с длиной волны 1,25 см, был реализован в 1954 году Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) и группой под руководством Ч. Таунса в Колумбийском университете (США). Первые квантовые усилители СВЧ-диапазона были созданы в 1956 году в ФИАН под руководством А.М. Прохорова и в фирме “Белл телефон” (США) [1].

Квантовые генераторы СВЧ, обладающие высокой стабильностью частоты, нашли применение в службе времени, радионавигации. Квантовые парамагнитные усилители с чрезвычайно низким уровнем собственных шумов позволили повысить на два – три порядка чувствительность приемных устройств СВЧ-диапазона, что обеспечило громадный успех в радиоастрономии, трансконтиненталь-

ной связи через космос и вообще в приеме слабых сигналов.

В оптике же привыкли иметь дело со спонтанным (шумовым) излучением, вопрос о создании мощного генератора когерентных колебаний у оптиков как-то вообще не возникал. Первый лазер был создан в 1960 году, через 6 лет после создания мазера, причем определяющими для его создания были идеи и предложения создателей мазеров А.М. Прохорова и Н.Г. Басова (ФИАН), И. Таунса и А. Шавлова (США).

Появление лазеров произвело революцию в оптике: появились не существовавшие до этого мощные источники когерентного излучения с высокой направленностью, яркостью, способные концентрировать громадную энергию в чрезвычайно малых спектральных, временных и пространственных интервалах.

В становлении и развитии квантовой радиофизики, создании мазеров и лазеров большую роль сыграли работы отечественных ученых. Международным признанием этой роли явилось присуждение в 1964 году Н.Г. Басову и А.М. Прохорову вместе с Ч. Таунсом Нобелевской премии по физике за “основополагающие работы в области квантовой радиофизики, которые привели к созданию генераторов и усилителей в радио и оптическом диапазоне длин волн (мазеров и лазеров)”.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ЛАЗЕРА

Как уже отмечалось, генерация в лазере достигается за счет индуцированного излучения на некотором переходе между уровнями квантовой системы. Рисунок 1 демонстрирует возможные переходы в простейшей двухуровневой системе, как вызванные полем (поглощение и индуцированное излучение), так и не зависящие от него (спонтанное излучение и безизлучательная релаксация).

Отсутствие внешнего поля спонтанное излучение и безизлучательные релаксационные процессы определяют время жизни частицы в возбужденном состоянии (τ_2 и τ_1 на рис. 1) Из-за конечности этого времени (и из-за других причин, например доплеровского смещения частоты для движущихся микрочастиц) линия излучения, соответствующая переходу, оказывается уширенной [2].

Обозначенные на рисунке 1 вероятности имеют вид

$$W_{12} = B_{21}\rho S(\nu), \quad W_{21} = B_{12}\rho S(\nu)$$

и зависят как от свойств квантовой системы (через коэффициенты Эйнштейна B_{21} и B_{12}), так и от приложенного поля – объемной плотности его энергии ρ и совпадения частоты поля ν с центральной частотой перехода ν_0 , что учитывается специальной функцией $S(\nu)$. При одинаковой степени вырождения уровней $B_{21} = B_{12}$, $W_{21} = W_{12}$ [2]. При этом, чтобы вынужденное излучение преобладало над

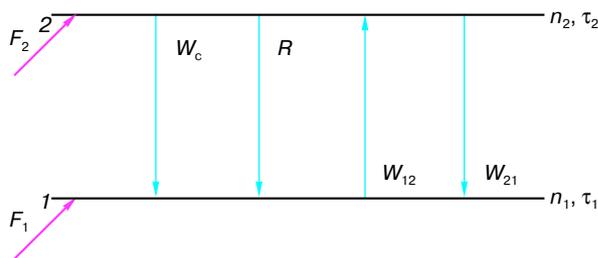


Рис. 1. Возможные переходы в двухуровневой системе. Вероятности: W_c – спонтанного излучения, R – безизлучательной релаксации, W_{12} – поглощения, W_{21} – индуцированного излучения. n_2 и n_1 – Плотности населенностей, τ_2 и τ_1 – времена жизни уровней. F_2 и F_1 – скорости накачки (число частиц, поставляемых в единицу времени и в единицу объема) на уровни 2 и 1.

поглощением, то есть число переходов вниз $W_{21}n_2$ было больше числа переходов вверх $W_{12}n_1$, необходимо, чтобы $n_2 > n_1$: на верхнем уровне частиц должно быть больше, чем на нижнем.

Среда, для которой выполняется условие $n_2 > n_1$, называется средой с инвертированной населенностью, и условие инверсии $n_2 > n_1$ является необходимым условием для усиления волны средой и работы лазера.

Ясно, что при термодинамическом равновесии инверсия существовать не может, поскольку, согласно закону Больцмана,

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}},$$

и на верхнем уровне частиц меньше, чем на нижнем. Поэтому для получения инверсии среду нужно увести от состояния равновесия.

Инверсия населенностей в лазерах достигается в результате совместного действия процессов заселения (накачки) соответствующих уровней и их дезактивации (очистки)

Согласно рисунку 1, для достижения стационарной инверсии необходимо выполнение соотношения

$$F_2\tau_2 > F_1\tau_1,$$

то есть произведение скорости накачки на время релаксации для верхнего уровня должно быть больше, чем для нижнего. Из этого следует, что предпочтительной является селективная накачка и что инверсия может быть достигнута не только за счет преимущественного заселения верхнего лазерного уровня, но и за счет высокой скорости очистки нижнего.

Заселение уровней в лазерах может осуществляться [3, 4]:

– за счет поглощения света (оптическая накачка). Подбирая источник света с соответствующим спектром, можно обеспечить высокую селектив-

ность накачки. Наиболее успешно этот вид накачки используется в твердотельных (на кристаллах и стеклах) лазерах и в лазерах на красителях.

– в неупругих столкновениях атомов и молекул со свободными электронами, при которых часть энергии электрона идет на возбуждение атома или молекулы. Свободные электроны могут создаваться или в газовом разряде, или вводиться в газ в виде пучка, сформированного в ускорителе.

– за счет неупругих столкновений атомов рабочего вещества с возбужденными атомами или ионами вспомогательного газа с передачей энергии возбуждения от них рабочему веществу. В некоторых типах столкновений передача энергии носит резонансный характер и достигается высокая степень селективности заселения уровней.

– в процессе специально подобранных химических реакций (химическая накачка); при этом возбуждаются колебательные уровни молекул, причем возбуждение может быть селективным.

– за счет нагрева (тепловая накачка). Этот метод используется для накачки колебательных уровней в молекулах, инверсия на переходах между которыми осуществляется за счет различных времен релаксации для верхнего и нижнего лазерных уровней при быстром адиабатическом расширении газа. На этом принципе основана работа газодинамических лазеров.

Очистка возбужденных состояний осуществляется: спонтанным излучением; в столкновениях с электронами или атомами примесного газа, при которых энергия возбуждения передается от рабочего вещества электронам или атомам примеси; при адиабатическом расширении газа; в специально подобранных химических реакциях.

Таким образом, среда с инверсией населенности способна усиливать световую волну. При коэффициенте усиления на единицу длины α и длине среды l поданный на ее вход сигнал интенсивностью I_1 будет усилен (при отсутствии насыщения) до значения $I_2 = I_1 e^{\alpha l}$ на выходе; то есть таким образом может быть реализован оптический усилитель когерентного сигнала с коэффициентом усиления по мощности $G = e^{\alpha l}$.

Чтобы превратить усилитель в генератор, необходимо организовать обратную связь. В лазерах она достигается при помещении активного вещества между отражающими поверхностями (зеркалами), образующими так называемый “открытый резонатор” за счет того, что часть излученной активным веществом энергии отражается от зеркал и опять возвращается в активное вещество (рис. 2). Следует отметить, что система из двух параллельных зеркал обладает резонансными свойствами – резонирует только на определенных частотах – и выполняет в лазере еще и ту роль, которую в обычных низкочастотных генераторах играет колебательный контур. Использование именно открытого резонатора (а не

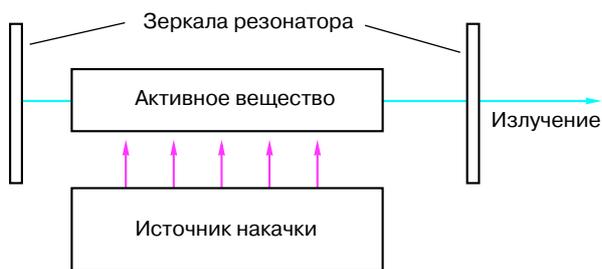


Рис. 2. Принципиальная схема лазера.

закрытого – замкнутой металлической полости – характерного для СВЧ диапазона) принципиально, так как в оптическом диапазоне резонатор с размерами $L = \lambda$ (L – характерный размер резонатора, λ – длина волны) просто не может быть изготовлен, а при $L \gg \lambda$ закрытый резонатор теряет резонансные свойства, поскольку число возможных типов колебаний становится настолько большим, что они перекрываются [2]. Отсутствие боковых стенок значительно уменьшает число возможных типов колебаний (мод) за счет того, что волны, распространяющиеся под углом к оси резонатора, быстро уходят за его пределы, и позволяет сохранить резонансные свойства резонатора при $L \gg \lambda$.

Однако резонатор в лазере не только обеспечивает обратную связь за счет возврата отраженного от зеркал излучения в активное вещество, но и определяет спектр излучения лазера, его энергетические характеристики, направленность излучения [4].

В простейшем приближении плоской волны условие резонанса в резонаторе с плоскими зеркалами заключается в том, что на длине резонатора укладывается целое число полувольт: $L = q \frac{\lambda}{2}$ (q – целое число), что приводит к выражению для частоты типа колебаний с индексом q :

$$\nu_q = q \frac{c}{2L}$$

и расстоянию по частоте между соседними (q отличается на 1) модами:

$$\Delta \nu_{\square} = \frac{c}{2L}.$$

На рисунке 3 приведен частотный профиль коэффициента усиления в рабочем веществе (он определяется шириной и формой линии рабочего вещества) и набор собственных частот открытого резонатора. Для используемых в лазерах открытых резонаторов с высокой добротностью полоса пропускания резонатора $\Delta \nu_{\square}$, определяющая ширину резонансных кривых отдельных мод (кривые 2 – 4 на рис. 3), и даже расстояние между соседними модами $\Delta \nu_{\square}$ оказываются меньше, чем ширина линии усиления $\Delta \nu_{\square}$, причем даже в газовых лазерах, где

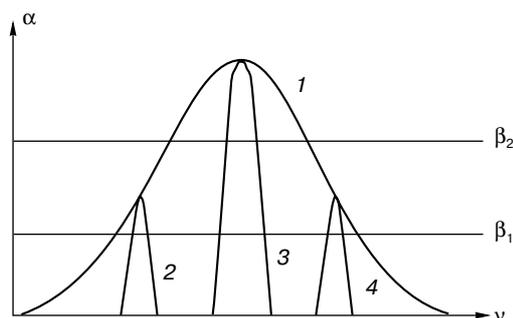


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента усиления в рабочем веществе α (кривая 1) и попадающие в контур усиления типы колебаний резонатора (2 – 4). При уровне потерь β , могут генерировать три моды, при β_2 – одна центральная.

уширение линий наименьшее. Поэтому в контур усиления попадает несколько типов колебаний резонатора.

Таким образом, лазер не обязательно генерирует на одной частоте, чаще наоборот, генерация происходит одновременно на нескольких типах колебаний, для которых усиление α больше потерь в резонаторе β (три моды на рис. 3 при $\beta = \beta_1$). Для того чтобы лазер работал на одной частоте (в одночастотном режиме), необходимо, как правило, принять специальные меры (например, увеличить потери, как это показано на рисунке 3) или изменить расстояние между зеркалами так, чтобы и в контур усиления попадала только одна мода. Поскольку в оптике, как отмечено выше, $\Delta \nu_{\square} > \Delta \nu_p$ и частота генерации в лазере определяется в основном частотой резонатора, то, чтобы держать стабильной частоту генерации, необходимо стабилизировать резонатор.

Итак, если коэффициент усиления в рабочем веществе перекрывает потери в резонаторе для определенных типов колебаний, на них возникает генерация. Затравкой для ее возникновения являются, как и в любом генераторе, шумы, представляющие в лазерах спонтанное излучение.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ

Если в процессе работы лазера параметры резонатора (потери и связанная с ними добротность) остаются неизменными, лазер работает в так называемом “режиме свободных колебаний”. Очевидно, что в этом случае при стационарной накачке лазер будет работать в непрерывном режиме, при импульсной накачке – в импульсном.

Достоинством непрерывного режима является то, что в этом режиме наиболее полно реализуются такие свойства лазеров, как монохроматичность, когерентность, направленность и низкий уровень шумов излучения.

В импульсном режиме в активную среду может быть введена значительно более высокая мощность накачки и соответственно получены большие мощности генерации. Кроме того, в импульсном режиме за счет переходных процессов может быть получена инверсия и генерация на таких переходах, где в стационарном режиме инверсия достигнута быть не может.

Отметим, что импульсный режим генерации может быть осуществлен и за счет управления параметрами резонатора [3, 4]. Ниже рассмотрены два примера, иллюстрирующие это.

Режим модулированной добротности (режим генерации гигантских импульсов)

Допустим, что накачка осуществляется при низкой добротности резонатора (высоких потерях), так что генерация возникнуть не может. Тогда может быть достигнута максимальная для данной скорости накачки F_2 разность населенностей Δn_0 и в единице объема вещества запасена энергия $\Delta U_0 = h\nu_0 \Delta n_0 \approx h\nu_0 F_2 \tau_2$. Отметим, что при стационарном резонаторе с низкими потерями это значение Δn_0 достигнуто быть не может, поскольку по достижении порога и возникновении генерации инверсия больше не растет, так как накачка, превышающая пороговую, уходит в лазерное излучение.

Если эту запасенную энергию высветить в импульсе длительностью τ_{\square} , то получается удельная мощность

$$P_{\square} = \frac{h\nu_0 F_2 \tau_2}{2\tau_{\square}} = P_1 \frac{\tau_2}{2\tau_{\square}},$$

поскольку $P_1 = h\nu_0 F_2 \tau_2$ есть максимальная (с единицы объема) мощность в непрерывном режиме. При $\tau_{\square} \ll \tau_2$ можно получить существенный выигрыш в мощности.

Режим модулированной добротности осуществляется следующим образом: по достижении максимальной инверсии добротность резонатора быстро увеличивается, потери уменьшаются и начинает развиваться генерация, проходя сперва линейный этап развития из спонтанного излучения, а затем быстрый нелинейный этап, за время которого запасенная в рабочем веществе энергия выплескивается в виде короткого (на практике до 3 – 10 нс) и мощного импульса. Типичные значения достигаемых мощностей соответствуют $10^7 - 10^8$ Вт, рекордные – $10^{13} - 10^{15}$ Вт. Например, для рубинового лазера, дающего в режиме свободных колебаний $P = 10^3$ Вт при $\tau_{\square} = 10^{-3}$ с, в режиме модулированной добротности ($\tau = 10$ нс) $P = 10^8$ Вт, то есть возрастает на 5 порядков.

Быстрое включение добротности (изменение потерь от высоких к низким) можно осуществить различными способами: механическим, вращая одно из зеркал, или электрооптическим, помещая в ре-

зонатор ячейку Керра, работу которой как затвора можно обеспечить подачей на нее напряжения.

Метод синхронизации продольных мод

Еще более короткие световые импульсы удается получить, используя метод синхронизации продольных мод [4, 5]. Как уже отмечалось, расстояние между продольными модами меньше ширины линии рабочего перехода в лазере, и возможна генерация лазера на нескольких продольных модах.

В газах ширина линии $\Delta\nu$ составляет около 10^9 Гц, в твердотельных лазерах $10^{11} - 10^{12}$ Гц, в лазерах на красителях $10^{13} - 10^{14}$ Гц. При $\Delta\nu_{\square} = 10^8$ Гц ($L = 1$ м) это дает число мод $M = \Delta\nu / \Delta\nu_{\square}$ от 10 для газовых лазеров до $10^5 - 10^6$ для лазеров на красителях.

В обычных условиях излучение разных мод не связано (не синхронизировано) друг с другом и отдельные моды выступают как независимые генераторы. Если жестко связать фазы отдельных мод, то есть заставить их генерировать синхронно, излучение лазера приобретает вид последовательности коротких импульсов, следующих друг за другом с периодом $T = 2L/c$ и имеющих в пределе длительность $\tau_{\square} = 1/\Delta\nu_{\square}$. Мощность в импульсе при этом резко возрастает (в M раз) по сравнению с несинхронизированным режимом.

Жесткого закрепления фазовых соотношений между модами можно добиться, осуществляя модуляцию потерь в резонаторе с частотой $f = \Delta\nu_{\square}$. При этом генерируемое излучение (скажем, на центральной моде с частотой ν_0) модулируется по амплитуде с частотой $f = \Delta\nu_{\square}$, а значит, в его спектре возникают дополнительные составляющие, отстоящие от несущей на частоты, кратные частоте модуляции, то есть совпадающие по частоте с частотами соседних мод и играющие для них роль вынуждающей силы, в результате чего достигается синхронизация.

В режиме синхронизации от лазеров удается получить сверхкороткие световые импульсы ($10^{-12} - 10^{-13}$ с) высокой мощности. С помощью специальных методов длительность импульсов удается довести до $10^{-14} - 10^{-15}$ с [5].

СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящее время лазеры перекрывают диапазон от ультрафиолета до субмиллиметровых волн, достигнуты первые успехи в создании рентгеновских лазеров, созданы перестраиваемые по частоте лазеры.

Мощность лазерного излучения в непрерывном режиме может быть порядка $10^5 - 10^6$ Вт, в импульсном – до $10^{12} - 10^{13}$ Вт, при этом удается достичь интенсивностей порядка $10^{12} - 10^{16}$ Вт/см². Существенно, что эти мощности могут быть сконцентрированы в чрезвычайно узких спектральных и временных интервалах.

Длительность импульса излучения в лазерах, работающих в режиме синхронизации мод, может составлять $10^{-12} - 10^{-13}$ с и специальными методами доводится до 10^{-15} с (за это время свет проходит всего $3 \cdot 10^{-5}$ см), то есть лазеры обладают удивительно высокой степенью концентрации энергии во времени.

Монохроматичность лазерного излучения, определяемая как $\Delta\nu_{\square}/\nu_0$ ($\Delta\nu_{\square}$ — ширина линии генерации, ν_0 — ее центральная частота), при работе лазера на одной частоте и в непрерывном режиме в принципе ограничена шумами [2, 4]. Используя специальные методы стабилизации, удается получить относительно высокую стабильность частоты $\Delta\nu_{\square}/\nu_0 = 10^{-12} - 10^{-13}$ ($\Delta\nu_{\square} = 50 - 500$ Гц) [5].

В случае лазера, работающего в многомодовом режиме, монохроматичность связана с числом генерируемых мод и может составлять несколько гигагерц. В импульсном режиме работы минимальная ширина линии ограничена величиной, обратной длительности импульса.

Высокая степень монохроматичности лазерного излучения определяет высокую спектральную плотность энергии — высокую степень концентрации световой энергии в очень малом спектральном интервале. Высокая монохроматичность облегчает фокусировку лазерного излучения, поскольку при этом хроматическая аберрация линзы становится несущественной.

Когерентность. Лазеры обладают чрезвычайно высокой по сравнению с другими источниками света степенью когерентности излучения, временной и пространственной.

Напомним, что временная когерентность определяется временем t_k , в течение которого излучение, испущенное из одной точки источника (или приходящее в данную точку пространства), остается когерентным (скажем, дает интерференционную картину в интерферометре Майкельсона). Пространственная когерентность определяется как когерентность излучения, испущенного из разных, находящихся на некотором расстоянии друг от друга точек источника, и может быть определена по контрасту интерференционных полос в известном опыте Юнга с двумя щелями.

При работе лазера в одномодовом режиме достигается полная пространственная когерентность, что определяет высокую направленность лазерного излучения и делает возможным его фокусировку в пятно чрезвычайно малых размеров (порядка длины волны).

Временная когерентность, связанная с монохроматичностью (время когерентности $t_k = 1/\Delta\nu_{\square}$), оказывается тоже очень высокой. Так, для непрерывно работающего лазера на He—Ne в одночастотном режиме при $\Delta\nu_{\square} \approx 1$ кГц $t_k = 10^{-3}$ с и длина когерентности $l_k = t_k c$ (c — скорость света) составляет $3 \cdot 10^7$ см (300 км), в то время как для нелазерных ис-

точников света (например, натриевая лампа) $t_k = 10$ с ($l_k = 3$ км). Таким образом, с использованием лазеров можно наблюдать интерференционную картину даже при разности хода лучей в несколько километров.

Направленность лазерного излучения во многом определяется тем, что в открытом резонаторе могут возбуждаться только такие волны, которые направлены по оси резонатора или под очень малыми углами к ней. При высокой степени пространственной когерентности угол расходимости лазерного луча θ может быть сделан близким к пределу, определяемому дифракцией. Типичные значения θ составляют: для газовых лазеров $(0,5 - 5) \cdot 10^{-3}$ радиан, у твердотельных $(2 - 20) \cdot 10^{-3}$ радиан, у полупроводниковых $(5 - 50) \cdot 10^{-2}$ радиан [5].

Яркость. Благодаря высокой направленности лазерные источники света обладают очень высокой яркостью, из-за чего на мишени можно получить очень большую интенсивность света. Так, гелий-неоновый лазер с мощностью всего 10 мВт и расходимостью излучения $3 \cdot 10^{-4}$ радиан при площади пучка $0,1$ см² имеет яркость 10^6 Вт/(см² · стерадиан), что во много раз превышает яркость Солнца (130 Вт/(см² · стерадиан)). (Отсюда выражение, что лазер ярче тысячи солнц.)

Перечисленные выше свойства делают лазеры уникальными источниками света и определяют возможность их многочисленных применений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Появление лазеров сразу оказало и продолжает оказывать влияние на различные области науки и техники, где стало возможным применение лазеров для решения конкретных научных и технических задач. Проведенные исследования подтвердили возможность значительного улучшения многих оптических приборов и систем при использовании в качестве источника света лазеров и привели к созданию принципиально новых устройств (усилители яркости, квантовые гиromетры, быстродействующие оптические схемы и др.). На глазах одного поколения произошло формирование новых научных и технических направлений — голографии, нелинейной и интегральной оптики, лазерных технологий, лазерной химии, использование лазеров для управляемого термоядерного синтеза и других задач энергетики.

Ниже приведен краткий перечень применений лазеров в различных областях науки и техники, где уникальные свойства лазерного излучения обеспечили значительный прогресс или привели к совершенно новым научным и техническим решениям.

Высокая монохроматичность и когерентность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в спектроскопии, инициировании химических реакций, в разделении изотопов,

в системах измерения линейных и угловых скоростей, во всех приложениях, основанных на использовании интерференции, в системах связи и светолокации. Особо следует, очевидно, выделить применение лазеров в голографии.

Высокая плотность энергии и мощность лазерных пучков, возможность фокусировки лазерного излучения в пятно малых размеров используются в лазерных системах термоядерного синтеза, в таких технологических процессах, как лазерная резка, сварка, сверление, поверхностное закаливание и размерная обработка различных деталей. Эти же свойства и направленность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в военной технике.

Направленность лазерного излучения, его малая расходимость применяются при провешивании направлений (в строительстве, геодезии, картографии), для целенаведения и целеуказания, в локации, в том числе и для измерения расстояний до искусственных спутников Земли, в системах связи через космос и подводной связи.

С созданием лазеров произошел колоссальный прогресс в развитии нелинейной оптики, исследовании и использовании таких явлений, как генерация гармоник, самофокусировка световых пучков, многофотонного поглощения, различных типов рассеивания света, вызванных полем лазерного излучения.

Лазеры успешно используются в медицине [6]: в хирургии (в том числе хирургии глаза) и терапии различных заболеваний, в биологии, где фокусировка в малое пятно позволяет действовать на отдельные клетки или даже на их части.

Большинство из перечисленных выше областей применения лазеров представляет собой самостоятельные и обширные разделы науки или техники и требует, естественно, самостоятельного рассмотрения. Цель приведенного здесь краткого и неполного перечня применений лазеров — проиллюстрировать то громадное влияние, которое оказало появление лазеров на развитие науки и техники, на жизнь современного общества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Донина Н.М.* Возникновение квантовой электроники. М.: Наука, 1974.
2. Квантовая электроника — маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1969.
3. *Карлов Н.В.* Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988.
4. *Тарасов Л.В.* Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981.
5. *Брюннер В., Юнге К.* Справочник по лазерной технике. / Под ред. А.П. Напартовича. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. *Приезжев А.В., Тучин В.В., Шубочкин Л.П.* Лазерная диагностика в биологии и медицине. М.: Наука, 1989.

* * *

Мирослав Францевич Сэм, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой квантовой радиофизики Физического факультета Ростовского государственного университета. Область научных интересов — физика газовых лазеров, ионных лазеров на парах металлов. Руководит работами по этому направлению в Ростовском университете. Автор более 130 научных работ и изобретений, в том числе монографии «Ионные лазеры на парах металлов» (М.: Энергоатомиздат, 1990 г.).