

ный стальной шарик, к площади отпечатка. Т. по Роквеллу — отношение силы вдавливания к глубине внедрения шарика или призмы. Получил распространение метод измерения Т. с помощью УЗ-колебаний (см. *Ультразвук*), в основе к-рого лежит измерение реакции колебат. системы (изменения её собств. частоты) на Т. испытуемого материала.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР — лазер, в к-ром активной средой являются активир. диэлектрич. кристаллы и стёкла или диэлектрич. кристаллы с собственными точечными дефектами. В качестве активаторов кристаллов и стёкол обычно служат ионы редкоземельных элементов или ионы группы железа. Собственные точечные дефекты в кристаллах возникают под воздействием ионизир. излучения или путём аддитивного окрашивания. Энергетич. уровни активаторов или собств. дефектов используются для создания инверсной населённости [1] (см. *Квантовая электроника*).

По существующей традиции, лазеры на основе полупроводниковых кристаллов выделены в особый класс (см. *Полупроводниковый лазер*) в силу присущей им специфики возбуждения и образования инверсии населённости на переходах между разрешёнными энергетич. зонами полупроводника (см. *Зонная теория*). Инверсная населённость в активной среде Т. л. достигается оптич. накачкой — освещением активного элемента (АЭ) спец. лампами, солнечным излучением, излучением пиротехн. устройств или излучением др. лазеров, в частности полупроводниковых.

Генерация Т. л. осуществляется по трёх- или четырёхуровневой схеме [2] (см. *Накачка*). АЭ этих лазеров обычно имеют форму кругового цилиндра или стержня прямоуг. сечения. Иногда применяют и АЭ более сложных конфигураций. Наиб. распространение получила конструкция Т. л., в к-рой цилиндрический АЭ вместе с газоразрядной лампой накачки помещаются в камеру-осветитель, концентрирующую излучение лампы накачки в АЭ. Из-за многократности отражения излучения накачки от внутр. поверхности камеры-осветителя достигается более полное его поглощение в АЭ. Применяют осветители, в к-рых одна лампа накачки работает на нескольких АЭ или, напротив, один АЭ накачивается несколькими или большим числом ламп. Диапазон длин волн генерации Т. л. простирается от УФ- до средней ИК-области. Т. л. работают в импульсном, непрерывном и квазинепрерывном режимах (см. *Лазер*). У существующих Т. л. мощность генерации в непрерывном режиме может достигать 1—3 кВт при уд. энергоёмке ~ 10 Вт с 1 см³ активной среды при КПД $\sim 3\%$. Ср. мощность 10^3 Вт при частоте повторения импульсов до 100 Гц реализуется в Т. л. импульсно-периодич. действия в режиме свободной генерации при длительности импульса 10^{-3} — 10^{-4} с.

Т. л. с успехом работают в режиме модуляции добротности резонатора, что позволяет генерировать гигантские импульсы, длительность и энергия к-рых зависят от скорости включения затвора и свойств активной среды. Обычные значения длительности таких импульсов $(1-10) \cdot 10^{-8}$ с. Их пиковая мощность ограничивается при этом оптич. прочностью активных и пассивных элементов резонатора, к-рая обычно составляет величину $\sim 5 \cdot 10^2$ МВт на 1 см² поверхности. Объёмная оптич. прочность лазерных материалов обычно оказывается выше. Модуляция добротности резонатора осуществляется как пассивным образом (насыщающиеся поглотители), так и активным (электро- и акустооптич. модуляторы). Иногда применяют и механич. модуляторы, напр. вращающуюся призму.

Большое соотношение ширины контура усиления Т. л. и частоты межмодовых биений ($\sim 10^3$) позволяет достаточно просто осуществлять режим синхронизации мод и получать сверхкороткие импульсы длительностью 10^{-11} — 10^{-13} с, ограниченной обратной шириной линии усиления. Так же, как и модуляция добротности, синхронизация мод в Т. л. осуществляется как активным, так и пассивным образом. Т. л. может также работать в режиме усилителя

излучения. При этом коэф. линейного усиления может достигать величины $0,5-0,7 \cdot 10^{-1}$.

Лазерный эффект обнаруживает большое кол-во разл. кристаллов и стёкол (неск. сотен), однако реально действующих Т. л., нашедших практич. применение, существенно меньше. К их числу относится лазер на кристалле рубина — первый в мире лазер, созданный в 1960 Т. Мейманом (Т. Maiman, США).

Рубин представляет собой кристалл корунда Al_2O_3 с примесью ($\approx 0,05\%$) ионов Cr^{3+} , замещающих в кристаллич. решётке ионы Al. Рубиновый лазер работает по трёхуровневой схеме, в к-рой уровнем 1 является осн. состояние 4A_2 , уровнем 2 — полосы 4F_2 и 4F_1 , уровнем 3 — дублет 2E . В мощных рубиновых лазерах применяют круглые стержни диам. ≈ 2 см и дл. 20—30 см. Типичный режим работы — импульсный, реализуются также модуляция добротности, синхронизация мод, усиление мощности. Длина волны генерации рубинового лазера $\approx 0,7$ мкм.

Наиб. распространённым активатором материалов для Т. л. являются ионы Nd^{3+} (см. *Неодимовый лазер*). Широкое применение в науке и технике находят лазеры на основе силикатных и фосфатных стёкол с неодимом (см. *Лазерные стёкла*), генерирующие излучения в области $1,05$ мкм. Осн. назначения лазеров на основе стёкол — это генерация одиночных импульсов большой мощности. АЭ из стекла отличаются высоким оптич. качеством, могут иметь большой объём при заданной форме элемента. Лазеры на основе фосфатного стекла с неодимом генерируют самые мощные импульсы генерации. Так, на установке «NOVA» (США), суммарный объём АЭ к-рой составляет $2 \cdot 10^6$ см³, получены импульсы энергией $\approx 4 \cdot 10^4$ Дж, длительностью $\sim 10^{-9}$ с, что соответствует мощности $\approx 4 \cdot 10^{13}$ Вт. Во второй ($\lambda \approx 0,53$ мкм) и третьей ($\lambda \approx 0,35$ мкм) гармониках частоты осн. перехода при такой же длительности импульсов энергия составляет $\approx 2 \cdot 10^4$ Дж.

Наиб. широко применяемой кристаллич. матрицей с Nd^{3+} является кристалл иттрий-алюминиевого граната (ИАГ — Nd^{3+}), к-рый в наиб. степени отвечает совр. требованиям квантовой электроники и её приложений. Необходимые спектрально-люминесцентные свойства этого кристалла удачно сочетаются с его высокой механич. прочностью, твёрдостью, значительной теплопроводностью ($0,13$ Вт/см²·К); ИАГ — Nd^{3+} -лазеры работают во всех перечисленных выше режимах. Именно на них получены рекордные мощности непрерывной генерации. Длина волны генерации ИАГ — Nd^{3+} -лазера на осн. переходе неодима $\lambda_r = 1,064$ мкм. Типичные размеры АЭ от 3×50 мм до 10×120 мм.

Находят также применение кристаллы алюмината иттрия ($YAlO_3 - Nd^{3+}$) и фторида лития-иттрия ($LiYF_4 - Nd^{3+}$). Кристаллы алюмината иттрия предпочитают неск. кристаллов ИАГ — Nd^{3+} для работы в режиме модулир. добротности, что связано с меньшим значением сечения осн. генерац. перехода и, следовательно, с уменьшением влияния суперлюминесценции и возможностью накопления большей энергии на верхнем лазерном уровне.

Отличит. чертами кристалла фторида лития-иттрия с неодимом являются отрицат. величина и малое абс. значение $\beta = dn/dT$ — температурного коэф. показателя преломления n ($\beta = -4,3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ для π -поляризации и $\beta = -2,2 \times 10^{-6} K^{-1}$ для σ -поляризации; для кристалла ИАГ, напр., $\beta = 7,3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$). Это обстоятельство существенно ослабляет проявления термооптич. эффектов, в частности эффекта наведённой термооптич. линзы, что увеличивает пространственную яркость излучения лазера. Длина волны генерации лазера на основе кристалла $LiYF_4 - Nd^{3+}$ сдвинута по сравнению с длиной волны генерации ИАГ — Nd^{3+} -лазера в коротковолновую сторону ($\lambda_r = 1,053$ мкм для σ -поляризации и $\lambda_r = 1,047$ для π -поляризации), что даёт возможность эфф. работы такого лазера с усилителем на основе стекла. КПД неодимовых лазеров на основе перечисленных кристаллов, как правило, не превышает 2—4% в режиме свободной генерации и 2% в режиме модуляции добротности.