

А. Е. САВКИН, В. И. УРОДОВ, С. Е. САВИЦКИЙ, С. Г. КОВЧУР

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Оптические квантовые генераторы, или лазеры, — это совершенно новые необычные источники света. Излучение лазеров характеризуется большой мощностью, высокой направленностью и происходит практически на одной частоте, или, как принято говорить, оно монохроматично.

Такую высокую направленность света, как у лазеров, в сочетании с большой мощностью нельзя получить от обычных источников ни какими, даже самыми совершенными зеркалами или другими оптическими системами. Рабочее тело лазера не раскалено, но, оставаясь при комнатной температуре, лазер генерирует излучение в миллиард раз большей плотности, чем Солнце. Подобно люминесцирующим телам лазеры являются холодными источниками света. Более того, с понижением температуры яркость их свечения увеличивается.

В 1960 г. был создан первый лазер на рубине, а в конце 1961 г. — газовый генератор непрерывного действия. В следующем году появились полупроводниковые оптические квантовые генераторы. В дальнейшем была получена генерация на сотнях новых объектов: кристаллах, стеклах, пластмассах, газах, жидкостях. Большим достижением квантовой электроники явилось создание лазеров на растворах органических красителей с плавной перестройкой частоты генерации.

Излучение существующих оптических квантовых генераторов охватывает широкий диапазон волн от 0,313 мкм (стекло с примесью ионов гадолиния) до 133 мкм (неон) и примыкает к коротким радиоволнам.

Наибольшие мощности излучения дают импульсные твердотельные лазеры. Газовые генераторы работают как в непрерывном, так и в импульсном режиме и характеризуются самой малой расходимостью луча и самой высокой монохроматичностью.

В настоящее время лазеры завоевали прочное положение в научно-исследовательских лабораториях, в ряде важных областей техники. К ним относятся, в частности, оптическая локация, лазерные гироскопы, голография (объемное фото), лазерная технология, в том числе точная обработка сверхтвердых и хрупких материалов. За последние годы лазеры из лабораторных установок превращаются в компактные приборы и покидают стены научных учреждений. У нас в стране и за рубежом серийно выпускаются десятки типовых лазерных установок для промышленности, строительства, связи, медицины и научных исследований.

Ниже рассмотрим применение квантовых генераторов в промышленности без анализа конкретных схем и физических процессов, лежащих в основе их работы.

**Тепловое действие лазерного луча на вещество.** С помощью оптической системы лазерный луч может быть сфокусирован на поверхности материала в пятнышке микроскопических размеров. Мощность излучения  $P$  в фокусной плоскости выражается формулой

$$P = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot f^2 \cdot \Theta \cdot t}, \quad (1)$$

где  $E$ —энергия светового импульса, обладающего длительностью  $t$ ,  $f$ —фокусное расстояние линз,  $\Theta$ —угол расходимости луча. Диаметр пятна примерно равен  $d = f \cdot \Theta$ .

Минимальное значение  $\Theta$  определяется дифракционной расходимостью луча и оценивается по формуле Релея

$$\Theta_{\text{диф}} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны излучения,  $D$  — диаметр рабочего тела генератора. Следовательно, в пределе диаметр пятна

$$d = \frac{1,22f}{D} \cdot \lambda$$

сравним с длиной волны и для видимого диапазона выражается несколькими микронами. В газовых лазерах величина  $\Theta$  близка к дифракционному углу расходимости, в твердотельных — она в 2—3 раза больше.

Подставляя в (1) типичные значения параметров рубинового ОКГ, работающего в режиме свободной генерации:  $E = 1 \text{ Дж}$ ,  $t = 3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ ,  $\Theta = 3 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$  ( $= 17'$ ) и  $f = 2 \text{ см}$ , находим

$$P = 35 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}.$$

В режиме моноимпульсной генерации время  $t$  сокращается до  $5 \cdot 10^{-9}$  сек, что при той же энергии дает  $P=21$  Гвт/см<sup>2</sup>. Такой концентрации энергии достаточно, чтобы превратить в плазму любое вещество.

Локальное нагревание позволяет проводить термообработку, отжиг, поверхностное окисление, диффузию и стимулировать фотохимические реакции. Плавление используется для направленной кристаллизации, зонной плавки, сварки деталей.

Испарение дает возможность осуществить резку, гравирование, направленное раскалывание, сверление отверстий и удаление материала с поверхности.

**Сварка.** У лазерной сварки своя специфическая область применения. Это — сваривание миниатюрных тугоплавких деталей, сваривание в труднодоступных местах, в закрытых вакуумных баллонах, в тех случаях, когда недопустимо длительное разогревание деталей.

Благодаря короткому времени воздействия луча можно производить сварку вблизи теплочувствительных и магнитных элементов без нарушения их физических свойств. Так, осуществлена контактная приварка никелевого ушка миниатюрных транзисторов к коваровому штырю. Испытания на вибрацию показали более высокую прочность лазерной сварки по сравнению с контактной.

Наряду с установками для микросварки созданы большие сварочные аппараты, которые позволяют получать длинные тонкие сварные швы в таких металлах, как титан, ниобий и бериллий. Получаются швы высокой прочности на изделиях, применяемых в космосе.

**Сверление отверстий.** В самых первых опытах с лазерным излучением была обнаружена его способность прожигать отверстия. С помощью твердотельных лазеров пробивались дырки в стопке лезвий для безопасной бритвы, шайбах, монетах и т. п.

В дальнейшем оказалось, что с помощью лазера можно получить отверстия диаметром до 0,005 мм в любом материале, включая самые прочные, такие как рубин и алмаз. Уже сейчас лазерное излучение используют при массовом изготовлении алмазных фильер, предназначенных для протягивания проволоки, а также при изготовлении прядильных машин. Имеются сообщения об изготовлении рубиновых камней для часовой промышленности и сверлении отверстий в твердой огнеупорной керамике.

К преимуществам лазерного сверления относятся: отсутствие механического контакта между материалом и инструментом, простота и точность разметки, возможность получения больших величин отношения глубины отверстия к его диаметру. В отличие от электронно-лучевого метода обработки

твердых материалов здесь не требуется создавать и поддерживать высокий вакуум.

**Резка, гравирование, раскалывание.** Мощные газовые лазеры непрерывного действия на смеси  $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—He}$  находят все более широкое применение для резания металлов, стекла, керамики, кварца и других материалов.

При обработке хрупких материалов, например, стекла и керамики, на поверхности обычно наносятся канавки или царапины, значительно ослабляющие прочность материала в этом месте. Вдоль канавки материал легко раскалывается. Для нанесения канавок и гравировки весьма удобны импульсные лазеры с большой частотой повторения импульсов. Такие лазеры позволяют испарять материал с поверхности без разогрева или оплавления образца.

Сфокусированный луч нагревает вещество, создает в нем термические напряжения и в хрупком материале появляются микротрещины. Если образец движется относительно луча, то происходит непрерывное направленное раскалывание. Так можно обрабатывать вещества со значительным коэффициентом термического расширения.

**Эмиссионный спектральный анализ.** Современное производство не может обойтись без контроля химического состава сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Часто необходимо контролировать промежуточный продукт без остановки производственного процесса. Наряду с многочисленными химическими методами анализа вещества в послевоенные годы все шире применяется спектральный анализ. Благодаря экспрессности, точности и дешевизне спектрального анализа, его внедрение в производство сопровождается повышением производительности труда и снижением себестоимости продукции.

Методы спектрального анализа весьма разнообразны. Сущность эмиссионного спектрального анализа, в частности, сводится к следующему. С помощью электрической дуги или искры проба вещества испаряется и нагревается до нескольких тысяч или десятков тысяч градусов. В возбужденном состоянии атомы каждого элемента испускают свой специфический набор спектральных линий. По интенсивности линий можно судить о концентрации данного элемента в пробе.

К сожалению, химические методы анализа не всегда можно заменить на спектральные. Одна из причин связана с трудностями возбуждения неэлектропроводных, твердых и жаропрочных сплавов. Непроводящие пробы необходимо измельчать, смешивать с угольным порошком и сжигать в дуге. Это усложняет анализ и снижает его точность. В проводящих пробах возможно селективное поступление вещества в облако разряда, и значительное отклонение его химического состава от состава исследуемого вещества.

Появление лазеров позволяет преодолеть многие трудности эмиссионного спектрального анализа. С помощью лазера можно либо непосредственно возбудить любой самый тугоплавкий материал, либо испарить и нанести пробу вещества на угольные электроды.

Ничтожно малое время воздействия светового импульса на вещество обеспечивает строго локальное разогревание пробы и отсутствие селективного поступления элементов. Количество вещества, испаренного за одну вспышку и достаточное для получения спектра, может составлять одну миллионную долю грамма. Поэтому такой анализ не оставляет заметных следов даже на деталях часового механизма.

Подобно сварке эмиссионный анализ с помощью лазера можно производить в труднодоступных местах и герметизированных баллонах.

Лазерный спектрометр — мечта геологов. Ведь им приходится иметь дело с образцами, где ценные элементы и минералы содержатся в виде точечных вкраплений. В этом случае лазерный луч незаменим.

**Точные измерения.** Лазеры нашли широкое применение при определении длин, расстояний между объектами (дальномеры) и скоростей движущихся предметов. Лазерное излучение используется для измерения собственной частоты вибраций предметов. Высокая направленность (малая угловая расходимость) лазерного излучения используется при прокладке туннелей и бурении скважин, для настройки оптических систем и центрирования станков (труб). Красный луч гелий — неоновый лазер служил отвесом при строительстве самой высокой в мире Останкинской телевизионной башни в Москве.

**Техника безопасности.** Хотя лазеры способны развивать огромные мощности, однако при соблюдении соответствующих норм техники безопасности длительное время работы с ними не представляет никакого вреда для человека. Очень важно защитить глаза и кожу от прямого попадания лазерного луча, так как известны случаи полной или частичной слепоты, а также ожогов лица и рук.

В январе 1968 года в Медицинском исследовательском центре университета Цинциннати (США) состоялась первая международная конференция по технике безопасности при работе с лазерами. Конференция приняла рекомендации о допустимых уровнях лазерного облучения. Для глаза со зрачком в 3 мм допустима энергия в моноимпульсе  $5 \cdot 10^{-8}$  дж/см<sup>2</sup> и  $5 \cdot 10^{-7}$  дж/см<sup>2</sup> в режиме свободной генерации. Для непрерывной освещенности принята норма  $5 \cdot 10^{-6}$  вт/см<sup>2</sup>. Для кожи безвредными считаются энергии до 0,1 дж/см<sup>2</sup> в импульсе и мощности до 1 вт/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме.