

Использование перестраиваемых источников излучения на основе оптических параметрических генераторов в молекулярной физике и квантовой нанофотонике

Многочисленные экспериментальные задачи современной науки и техники требуют использования управляемых источников непрерывного узкополосного излучения, с возможностью плавной перестройки длины волны в видимой и ближней ИК-области спектра. Для генерации такого излучения в настоящее время наиболее часто используются оптические параметрические генераторы.

Оптические параметрические генераторы (англ. *Optical Parametric Oscillators* – ОРО) [1] обеспечивают излучение, близкое к лазерному, но процесс его генерации имеет два главных отличия от лазерной генерации. Первое отличие заключается в том, что принцип работы ОРО основан на процессе параметрического взаимодействия световых волн в нелинейном оптическом материале, а не на вынужденном излучении в конкретной усиливающей среде. Второе – состоит в том, что ОРО требует использования когерентного источника излучения в качестве накачки, в отличие от лазеров, которые могут накачиваться либо некогерентными источниками света, либо другими источниками.

Процесс работы ОРО (рис. 1а) основан на генерации двух световых волн с частотами ω_s и ω_i в нелинейном кристалле, облучаемом мощной световой волной накачки с частотой ω_p . Если исходное излучение является монохроматическим, то $\omega_p = \omega_s + \omega_i$, что выражает закон сохранения энергии взаимодействующих фотонов. Из условий фазового синхронизма также следует соотношение $k(\omega_p) = k(\omega_s) + k(\omega_i) + \Delta k$.

ОРО не ограничены определенной длиной волны, продиктованной энергетическими уровнями и переходами в усиливающей среде, а отличаются генерацией настраиваемого лазерного излучения на произвольных диапазонах длин волн, в чем и заключается их огромный потенциал. В зависимости от требуемой мощности в качестве непрерывной лазерной накачки могут быть использованы либо твердотельные лазеры с диодной накачкой (для малой мощности), либо оптоволоконные лазеры (для более высокой мощности).

Поскольку длина волны сгенерированного излучения больше длины волны накачки, ОРО-устройства, работающие в видимом диапазоне, требуют либо использования УФ-источников в качестве исходной накачки, либо дополнительных ступеней преобразования частоты. Во втором типе ОРО реализована каскадная последовательность нелинейных оптических процессов в двух резонаторах: ОРО и блоке генерации второй гармоники (англ. *Second Harmonic Generation* – SHG).

В то время как одна из сгенерированных волн циркулирует внутри резонатора ОРО, вторая извлекается для преобразования длины волны в видимую другим нелинейным процессом, которое происходит во втором отдельном SHG-резонаторе путем удвоения частоты излучения. Генерация сигнальной / опорной волны на определенной частоте осуществляется путем прецизионной подстройки нелинейного кристалла с периодической структурой. При этом эффективная длина резонатора активно стабилизируется для выбранной длины волны. В качестве нелинейной среды используют кристаллы ниобата лития (LiNbO_3), кристаллическая структура которого обеспечивает необходимую периодичность.

В типичном коммерчески доступном ОРО (рис. 1б) накачка осуществляется на длине волны $\lambda = 532$ нм, в первом каскаде генерируется сигнальная и холостая волны в диапазоне длин волн от 900 до 1300 нм, во втором каскаде SHG происходит удвоение частоты холостой волны, что позволяет осуществлять непрерывную перестройку длины волны в диапазоне от 450 до 650 нм с выходной мощностью до нескольких сотен милливатт и типичной шириной линии <500 кГц. Долговременная стабильность таких источников может достигать ± 1 МГц на протяжении 10 часов.

Одним из наиболее актуальных приложений ОРО в решении экспериментальных задач современной фотоники стало детектирование спектров возбуждения флуоресценции одиночных молекул (англ. *Single Molecule* – SM) и в общем случае одиночных квантовых излучателей различной природы. Высокий научно-технологический потенциал таких исследований состоит в высокой чувствительности спектров SM к параметрам окружающей среды. Пример регистрации спектров возбуждения флуоресценции SM дибензоантатрена, внедренных в кристаллический нафталин при криогенных температурах (рис. 2), описан в работе [2], выполненной в Институте физики света Макса Планка (Германия). В таких условиях ширина бесфонной линии SM может иметь значения в диапазоне 10–50 МГц. Для регистрации спектра перестройка возбуждающего лазерного излучения осуществлялась с использованием ОРО в диапазоне 4 ГГц с центром диапазона сканирования на длине волны $\lambda = 618$ нм. Возможность же непрерывного сканирования частоты узкополосного излучения в широком диапазоне длин волн открывает беспрецедентные перспективы для развития методов диагностики материалов с использованием техники флуоресцентной нанокопии с детектированием множества одиночных примесных зондовых молекул [3].

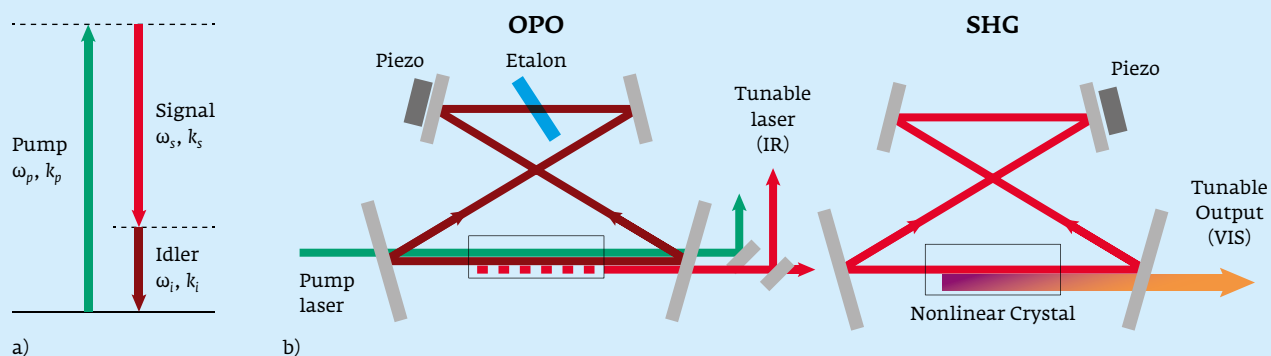


Рис. 1. Схемы работы оптических параметрических генераторов: а) – энергетическая схема генерации сигнальной и холостой волны в нелинейном кристалле; б) – принципиальная схема типичного ОРО (коммерческий продукт компании Hübner Photonics, Германия): в первом каскаде (ОРО) происходит нелинейное параметрическое усиление в нелинейном кристалле с активной стабилизацией параметров резонатора для выбранной сигнальной (бордовая линия) длины волн; холостая волна (красная линия) направляется во второй каскад (SHG), где происходит удвоение частоты в нанометрах

Лазерные системы на основе ОРО позволили также осуществить спектроскопическую характеристику вакансионных центров окраски в алмазе в широком диапазоне длин волн (от 460 до 650 нм) при достаточно высоких интенсивностях возбуждения и комнатной температуре [4]. Подобные центры окраски представляют значительный интерес в разработке новых подходов к созданию однофотонных источников света, в решении задач наносенсорной техники.

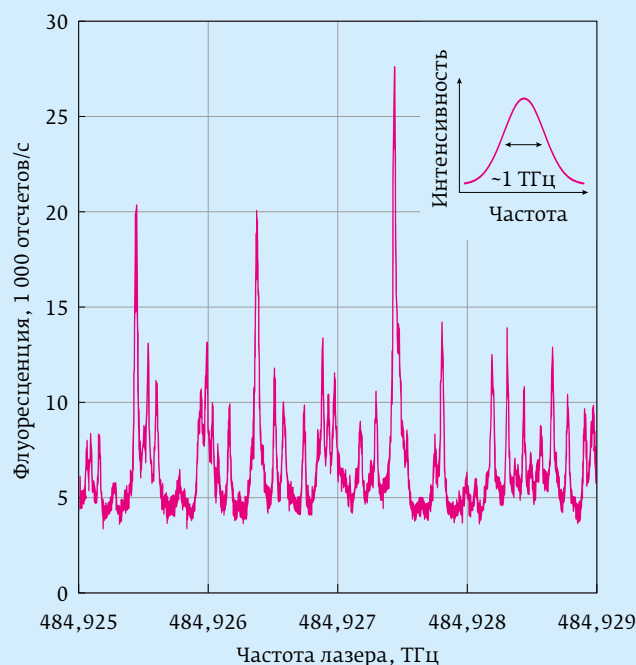


Рис. 2. Зависимость интенсивности сигнала флуоресценции молекул DBATT в кристалле нафталина от частоты возбуждения. Вставка: Схематическое изображение неоднородного уширения линий, соответствующих молекулам DBATT с шириной линии 1ТГц

Наконец, ОРО могут быть использованы для регистрации спектров комбинационного рассеяния света (КРС) перспективных материалов современной фотоники. В таких экспериментах также требуется прецизионная подстройка частоты возбуждающего узкополосного излучения. Например, в работе [5] ОРО был использован для регистрации спектров КРС одностенных углеродных нанотрубок.

Таким образом, уникальные возможности перестройки частоты излучения в широком диапазоне, которые обеспечивают устройства на основе ОРО, делают их конкурентной альтернативой традиционным (в т.ч. перестраиваемым) лазерам. Значительная часть приложений относится к самым актуальным задачам современной молекулярной физики и квантовой нанофотоники. Дальнейшие перспективы применения ОРО относятся к таким направлениям, как спектроскопия одиночных квантовых излучателей, флуоресцентная наноскопия, КРС одиночных молекул, разработка новых типов источников одиночных фотонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ebrahim-Zadeh M, Dunn M. H.** Optical Parametric Oscillators. In: *Nonlinear & Quantum Optics Handbook of Optics*, 2nd ed., chap. 22, 2001.
2. **Utikal T. et al.** Single molecule spectroscopy using C-WAVE. *Photonics Russia*, 2017; 5(11); 54–55, DOI: 10.22184/1993–7296.2017.65.5.52.55.
3. **Naumov A. V. et al.** Laser selective spectromicroscopy of myriad single molecules: Tool for far-field multicolour materials nanodiagnosics. *The European Physical Journal D*, 2014; 68; 11, art. 348. DOI: 10.1140/epjd/e2014–50414-x.
4. **Häußler S. et al.** Photoluminescence excitation spectroscopy of SiV- and GeV- color center in diamond. *New J Phys*, 2017; 19:1–9, DOI: 10.1088/1367–2630/aa73e5/meta.
5. **Thomsen C., Reich S.** Raman scattering in carbon nanotubes. *Top Appl Phys*, 2007; 108:115-232.

Е. П. Кожина, студент, Факультет физики и информационных технологий МПГУ, liza.kozhina.99@mail.ru; по материалам статьи J. Sperling, K. Hens, *Optical parametric oscillators offer a competitive alternative to conventional lasers for molecular physics and quantum nanophotonics*, *EuroPhotonics*, autumn, 2018, p.22–27