АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 6 1972

Физика оптических квантовых генераторов

УДК 621.378.001+621.378.325

Б. Б. АВЕРБУХ, А. В. ГАЙНЕР
(Новосибирск)

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ФЛЮКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ

На существование избыточных флюктуаций интенсивности гармоник, генерируемых многомодовой накачкой, было указано еще в [1]. В дальнейшем в [2, 3] проводилось теоретическое и экспериментальное исследование влияния многомодовости накачки на интенсивность второй гармоники. В настоящей работе изучены статистические флюктуации интенсивности третьей гармоники.

Возбуждение третьей гармоники осуществлялось смешением в кристалле KDP второй гармоники с основным излучением. Теоретическое рассмотрение этого процесса проводится в рамках следующей модели. Накачка считается многомодовой с эквидистантным спектром. Амплитуды мод E_n равны между собой ($E_n \equiv E_0$), а статистическое распределение фаз φ_n в интервале $(0,2\pi)$ задается вероятностной функцией распределения $\omega_\varphi = 1/2\pi$. Разность фаз между различными модами постоянна в течение одного импульса накачки:

$$A_1 = E_0 \sum_{n=1}^{N} e^{i\varphi_n} e^{-i(\omega_n t - \vec{k}_n \vec{z})} = E_0 \sum_{n=1}^{N} a_n e^{-i(\omega_n t - \vec{k}_n \vec{z})}. \tag{1}$$

Здесь A_1 — поле накачки; $\omega_n = \omega_0 + n\Delta\omega$ — частота n-й моды; $\Delta\omega$ — межмодовая частота; N — число мод. Процессы генерации второй и третьей гармоник рассматриваются в приближении заданного поля. Тогда поле второй гармоники A_2 представимо в виде

$$A_2 = BE_0^2 \sum_{n,m}^{N} a_n a_m e^{i(\vec{k}_n + \vec{k}_m)\vec{z} - i(\omega_n + \omega_m)t}, \tag{2}$$

а интенсивность равна

$$J_2 = |A_2|^2 = |B|^2 E_0^4 \sum_{n,m,k,l}^{N} a_n a_m a_k^* a_l^* \, e^{i(\vec{k}_n + \vec{k}_m - \vec{k}_k - \vec{k}_l)\vec{z} - i(\omega_n + \omega_m - \omega_k - \omega_l)t}. \tag{3}$$

Аналогично для третьей гармоники имеем:

$$A_3 = CE_0^3 \sum_{n,m,k}^{N} a_n a_m a_k e^{i(\vec{k}_n + \vec{k}_m + \vec{k}_k)\vec{z} - i(\omega_n + \omega_m + \omega_k)t}; \tag{4}$$

$$J_3 = |C|^2 E_0^6 \sum_{n,m,k,l,p,q}^{N} a_n a_m a_l a_p^* a_q^* a_k^* \exp\left\{i\left[\vec{k_n} + \vec{k_m} + \vec{k_l} - \vec{k_p} - \vec{k_q} - \vec{k_k}\right]\vec{z} - i\left[\omega_n + \omega_m + \omega_l - \omega_p - \omega_q - \omega_k\right]t\right\}. \quad (5)$$

Здесь B и C — константы.

Рассмотрим генерацию второй гармоники. Выражение (3) определяет мгновенное значение J_2. Но в результате эксперимента получается значение интенсивности, усредненное по времени наблюдения, много большему светового периода. При временном усреднении J_2 ненулевой вклад дадут только те члены суммы, в показателе экспоненты которых будет стоять нуль ($\omega_n + \omega_m - \omega_e - \omega_k = \Delta\omega$ $(n+m-l-k)=0$).

$$\overline{J}_2 = |B^2|\, E_0^4 \sum_{n,m,l,k}^{N} a_n a_m a_l^* a_k^* \delta_{n+m,l+k} = |B|^2\, E_0^4 \left\{ \sum_{n,m,l,k}^{N}{}''' a_n a_m a_l^* a_k^* \delta_{n+m,l+k} + \sum_{n}^{N} |a_n|^4 + \sum_{n,m,k}^{N}{}'' \left(a_n^2 a_m^* a_k^* + a_n^{*2} a_m a_k\right) \delta_{2n,m+k} + 2\sum_{n,m}^{N}{}' |a_n|^2 |a_m|^2 \right\}, \quad (6)$$

где черта сверху — временное усреднение; $\delta_{p,q}$ — символ Кронекера; Σ''', Σ'', Σ' здесь и далее обозначают, что среди n, m, l, k; n, m, k; n, m соответственно нет ни одной пары равных.

Для получения окончательного результата экспериментальные значения интенсивности $\overline{J}_2$ усреднялись по большому числу (50) импульсов накачки. В нашей модели это эквивалентно усреднению по распределению фаз. Члены, содержащие фазы, дадут нуль, и получаем

$$\langle \overline{J}_2 \rangle = |B|^2 E_0^4 \left\{ \sum_{n}^{N} |a_n|^4 + 2\sum_{n,m}^{N}{}' |a_n|^2 |a_m|^2 \right\} = J_1^2 + |B|^2 E_0^4 \sum_{n,m}^{N}{}' |a_n|^2 |a_m|^2 \sim E_0^4 (2N^2 - N). \quad (7)$$

Здесь $J_1 \sim E_0^2 N$ — средняя интенсивность основного излучения. Вычислим теперь среднеквадратичное отклонение величины J_2

$$\Delta J_2 = \sqrt{\langle \overline{J}_2^2 \rangle - \langle \overline{J}_2 \rangle^2} \Big/ \langle \overline{J}_2 \rangle. \quad (8)$$

Для этого представим J_2 в виде

$$J_2 = \langle \overline{J}_2 \rangle + \Phi, \quad (9)$$

где $\langle \Phi \rangle = 0$. Тогда

$$\langle \overline{J}_2^2 \rangle - \langle \overline{J}_2 \rangle^2 = \langle \Phi^2 \rangle. \quad (10)$$

Из (6) видно, что

$$\Phi = |B|^2 E_0^4 \left\{ \sum_{n,m,k,l}^{N}{}''' a_n a_m a_k^* a_l^* \delta_{n+m,\,k+l} + \sum_{n,m,k}^{N}{}'' \left(a_n^2 a_m^* a_k^* + a_n^{*2} a_m a_k\right) \delta_{2n,\,m+k} \right\}. \quad (11)$$

Видно, что по числу членов основной вклад дает первая сумма в (11), и, следовательно, в $\langle \Phi^2 \rangle$ нужно оценивать только вклад этой суммы. В результате получаем

$$\Delta J_2 \sim \sqrt{\frac{2}{3N}} \quad (N \geqslant 3). \quad (12)$$

Заметим, что из (7) можно получить следующее выражение:

$$\langle \bar{J}_2 \rangle \sim \frac{J_1^2}{N^2}(2N^2 - N) = J_1^2 (2 - 1/N), \tag{13}$$

т. е. хорошо известный результат [3], показывающий, что многомодовая накачка одинаковой интенсивности с одномодовой ($N=1$) эффективнее в $(2-1/N)$ раз при генерации второй гармоники.

Рассмотрим теперь генерацию третьей гармоники. Вычисления аналогичны случаю второй гармоники. Выражение (5) определяет мгновенное значение величины J_3. В результате временного усреднения получаем

$$\bar{J}_3 = |C|^2 E_0^6 \sum_{n,\,m,\,k,\,l,\,p,\,q}^{N} a_n a_m a_k a_l^* a_p^* a_q^* \delta_{n+m+k,\ l+p+q}\ . \tag{14}$$

Тогда средняя интенсивность третьей гармоники

$$\langle \bar{J}_3 \rangle = |C|^2 E_0^6 \left\{ \sum_n^N |a_n|^6 + 9 \sum_{n,\,m}^{N}{}' |a_n|^4 |a_m|^2 + 6 \sum_{n,\,m,\,k}^{N}{}'' |a_n|^2 |a_m|^2 |a_k|^2 \right\}. \tag{15}$$

Для оценки среднеквадратичного отклонения представим J_3 в виде

$$J_3 = \langle \bar{J}_3 \rangle + \Phi_1, \tag{16}$$

где $\langle \Phi_1 \rangle = 0$. Тогда

$$\langle \bar{J}_3^2 \rangle - \langle \bar{J}_3 \rangle^2 = \langle \Phi_1^2 \rangle\,. \tag{17}$$

Для оценки $\langle \Phi_1^2 \rangle$ достаточно определить величину $\left\{ \sum_{n,\,m,\,k,\,l,\,p,\,q}^{N}{}'''' a_n a_m a_k a_l^* a_p^* \cdot a_q^* \delta_{n+m+k,\ l+p+q} \right\}^2$, дающую максимальный вклад. Учитывая теперь, что $\langle \bar{J}_3 \rangle \sim 6N^3$, получаем окончательный результат:

$$\Delta J_3 \sim \sqrt{\frac{8}{10N}} \quad (N \geqslant 3). \tag{18}$$

Нами был проведен предварительный эксперимент. Луч ОКГ попадал на первый кристалл KDP_1 (длина 3 см; вырезан под углами $\theta=41°$, $\varphi=45°$). В удвоителе генерировалась вторая гармоника (тип синхронизма $\omega_0+\omega_0=2\,\omega_e$). Излучение накачки и 2-й гармоники попадало во второй кристалл KDP_2 (длина 2,2 см; вырезан под углами $\theta=57°$, $\varphi=0°$), где и происходила генерация третьей гармоники (тип синхронизма $\omega_e+2\omega_0=3\omega_e$). Для сравнения импульсов накачки, второй и третьей гармоник сигналы с фотоумножителей через соответствующие цепи с задержками подавались на осциллограф.

Среднеквадратичное отклонение величины J_3/J_1^3 составляло приблизительно 40% при теоретическом значении порядка 28% (для $N=10$). Среднеквадратичное отклонение величины J_2/J_1^2 было равно 20% при теоретическом значении порядка 25% (для $N=10$). Интенсивность основного излучения оставалась постоянной в пределах точности измерений, составлявшей около 10%.

Полученное расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями может, по-видимому, объясняться существованием дополнительных статистических флюктуаций интенсивности третьей гармоники, связанных с флюктуациями поперечной структуры основного излучения, которые не учитывались при теоретическом рассмотрении.

Результаты работы показывают, что при многомодовой накачке статистические флюктуации фаз мод вызывают значительные колебания интенсивности третьей гармоники, даже когда интенсивность основного излучения не флюктуирует. Поэтому для получения стабильной по интенсивности третьей гармоники необходима либо одномодовая накачка, либо многомодовая, но с синхронизованными фазами мод.

Авторы выражают благодарность Г. В. Кривощекову, Р. И. Соколовскому и С. И. Маренникову за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Ducuing, N. Bloembergen. Statistical Fluctuations in Nonlinear Optical Processes.— Phys. Rev., 1964, 6A, 133.
2. С. А. Ахманов, А. И. Ковригин, А. С. Чиркин, О. Н. Чунаев. Статистические эффекты при генерации оптических гармоник.— ЖЭТФ, 1966, т. 50.
3. В. В. Бакланова, А. С. Чиркин. О генерации второй гармоники дискретным спектром.— ЖПС, 1967, т. 7, вып. 2.

Поступила в редакцию
9 марта 1972 г.