

## КВАНТОВЫЕ ШУМЫ В ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЯХ СВЕТА

*С.А. Ахманов, В.В. Фадеев, Р.В. Хохлов, О.Н. Чунаев*

1. Предметом настоящего сообщения является изложение результатов эксперимента, в котором непосредственно регистрировались собственные (спонтанные) шумы параметрического усилителя (см. [1]), работавшего в видимом диапазоне оптического спектра: (0,5–0,6 мк)\*. Если пользоваться лазерными терминами, то речь идет о параметрической "люминесценции" и "сверхлюминесценции", обладающими рядом интересных особенностей.

2. Блок-схема экспериментальной установки, использовавшейся в наших опытах, показана на рис. 1. В усилителе использовался кристалл KDP длиной 4 см (KDP-III); накачкой служила третья гармоника неодимового лазера ( $\lambda_3 = 0,353$  мк), получавшаяся в кристаллах KDP-I и KDP-II путем каскадного преобразования частоты [2]. Максимальная плотность мощности накачки составляла около  $70 \text{ Мвт/см}^2$ ; расходимость  $7'$ ; излучение содержало около 10 спектральных линий (мод.). Усилительный кристалл был ориентирован таким образом, что накачка

возбуждала в нем необыкновенную волну; грани кристалла были нормальны направлению, вдоль которого осуществлялось одномерное синхронное взаимодействие волны накачки с волнами  $\lambda_2 = 0,53 \text{ мк}$  (обыкновенная) и  $\lambda_1 = 1,06 \text{ мк}$  (необыкновенная), т.е. имело место взаимодействие вида  $\gamma_e(\omega_1) + \gamma_o(\omega_2) \rightleftharpoons \gamma_e(\omega_3)$ ; угол  $\theta$  между осью образца и оптической осью кристалла был при этом равен  $\theta_0^3\omega - \omega = \theta_0^3\omega + \omega - 0^\circ 20'$  \*\*, где  $\theta_0^3\omega + \omega$  – угол синхронизма для генерации второй гармоники излуче-

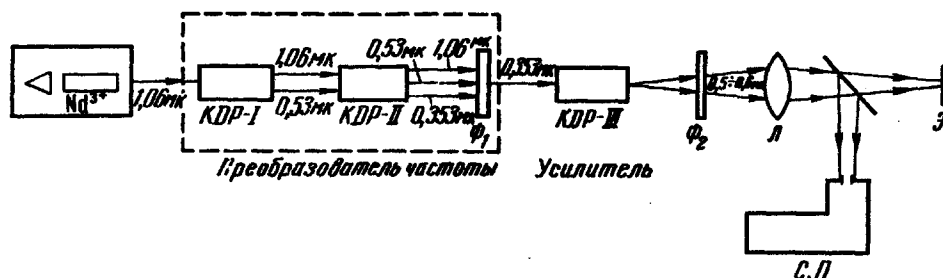


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.  $\Phi_1, \Phi_2$  – фильтры;  $L$  – линза с Фокусным расстоянием  $f = 10 \text{ см}$ ;  $\mathcal{E}$  – экран (или фотопленка) в фокальной плоскости линзы  $L$ ;  $СП$  – спектральный прибор – спектрограф ИСП-51, или монохроматор ЗМР-3 с фотоумножителем

ния неодимового лазера (взаимодействие  $\gamma_e(\omega) + \gamma_o(\omega) \rightleftharpoons \gamma_e(2\omega)$ ). Пространственная структура выходного сигнала в дальнем поле снималась на фотопленку, помещаемую в фокальной плоскости линзы (фокусное расстояние  $f = 10 \text{ см}$ ); частотный спектр анализировался с помощью узкополосных интерференционных светофильтров, а также на спектрографе ИСП-51; интенсивность оценивалась путем фотометрирования снимков и сравнения их со снимками калиброванного по мощности излучения за  $\lambda = 0,53 \text{ мк}$ , а также измерялась фотоумножителем (при этом спектрограф заменялся зеркальным монохроматором).

3. Наглядную информацию о характеристиках спонтанного шума дает наблюдение угловой структуры светового потока на выходе усилителя при различных ориентациях кристалла относительно луча накачки (варьировался угол между лучом накачки и оптической осью кристалла,  $\theta_3$ ). На рис. 2, а (см. вклейку) представлена фотография, полученная в условиях, когда на вход кристалла KDP-III наряду с накачкой поступал слабый сигнал на  $\lambda_1 = 1,06 \text{ мк}$ , а  $\theta_3 = \theta_0^3\omega - \omega + 1^\circ 30'$ . Яркие точка, кольцо и дуга связаны с генерацией дополнительной волны,  $\lambda_2 = 0,53 \text{ мк}$ , соответственно при: а – одномерном несинхронном взаимодействии волн  $\lambda_3$  и  $\lambda_1$  (точка); б – двумерном синхронном (фазовые скорости согласованы для неколлинеарных лучей) взаимодействии прямой волны накачки и рассеянного излучения с  $\lambda_1$  – слабое рассеяние неизбежно возникало в системе за счет дефектов на поверхностях кристаллов и т.п. (окружность); в – при синхронном одномерном взаимодействии рассеянных волн сигнала и накачки (дуга, вдоль которой

$\theta_3 = \theta_3^0 \omega - \omega = \text{const}$ ). Слабый фон, отчетливо видимый на фотографии, является спонтанным излучением. При фиксированной мощности накачки его интенсивность не зависит от мощности излучения неодимового лазера, проникающего через фильтр  $\phi_1$  на входе кристалла KDP-III.

Спектр спонтанного шума на выходе усилителя оказывается весьма широким; в наших опытах регистрировались компоненты в полосе 0,5–0,58 мк (при этом длина волны соответствующего спонтанного излучения на зеркальной относительно  $\omega_3/2$  частоте изменялась в пределах 1,21–0,9 мк). Наблюдение угловой структуры спонтанного шума через интерференционные фильтры показало, что кривые равных частот являются окружностями, диаметр которых растет с уменьшением длины волны  $\lambda_2$ . Угловую структуру спонтанного шума на фиксированной длине волны можно изменять за счет изменения ориентации кристалла; характерные фотографии для  $\lambda_2^1 = 0,557$  мк и различных  $\theta_3$  приведены на рис. 2, б. Видно, что по мере уменьшения  $\theta_3$  диаметр кольца уменьшается; при некотором значении угла  $\theta_3 = \theta_0(\lambda_2^1)$  кольцо сжимается в точку, а при  $\theta_3 < \theta_0(\lambda_2^1)$  интенсивность спонтанного излучения на  $\lambda_2^1$  резко уменьшается и его уже трудно обнаружить.

Приведенные результаты с очевидностью свидетельствуют, таким образом, что спонтанный шум генерируется в кристалле в общем случае за счет двумерного синхронного взаимодействия "шумовых" волн с прямой волной накачки (ср. с рис. 2, а; взаимодействие спонтанного шума с рассеянной волной накачки при небольшом рассеянии дает значительно более слабый эффект). Сказанное иллюстрируется спектрограммами рис. 3 (см. вклейку) (ширина щели спектрографа 0,4 мк). Здесь вершины дуг соответствуют одномерным взаимодействиям вида  $\gamma_e(\omega_1) + \gamma_o(\omega_2) \rightleftharpoons \gamma_e(\omega_3)$ , а ветви, обращенные в фиолетовую область, — двумерным взаимодействиям. Сопоставление экспериментальных данных, касающихся пространственно-частотной структуры спонтанного шума, с расчетными кривыми зависимости синхронных частот от направления в кристалле свидетельствует об их хорошем согласии.

4. Измеренная зависимость мощности спонтанного шума  $P_{\text{ш}}$  от мощности накачки  $P_3$  оказалась близкой к линейной вплоть до интенсивности накачки  $S_3 \approx 45$  Мвт/см<sup>2</sup>. При больших интенсивностях крутизна преобразования ( $dP_{\text{ш}}/dP_3$ ) заметно возрастает. При  $S_3 = 40$  Мвт/см<sup>2</sup> мощность спонтанного шума на  $\lambda_2 = 0,557$  мк в полосе 50 Å (полоса пропускания интерференционного фильтра) составила около  $10^{-4}$  вт, а плотность мощности в фокальной плоскости линзы с  $f = 10$  см  $S_{\text{ш}f} \approx 0,4$  вт/см<sup>2</sup>. При этой же интенсивности накачки коэффициент параметрического усиления сигнала на  $\lambda_1 = 1,06$  мк в том же кристалле KDP-III составил  $G = 3$ . Теоретическая оценка плотности мощности шума в фокальной плоскости линзы с  $f = 10$  см, выполненная на основе квантового расчета процесса распада фотонов накачки (см. [3, 4]), дает величину  $S_{\text{ш}f} = 0,7$  вт/см<sup>2</sup>.

5. В наших опытах мы не ставили задачи детального изучения пространственной и временной когерентности спонтанного шума; в описанной установке такие исследования затруднены многомодовым характером накачки. В настоящее время аналогичные изложенным измерения проводятся с одномодовой накачкой.

Следует отметить, что параметрическую "люминесценцию" удается наблюдать и в пучках газовых лазеров; такой эксперимент был выполнен в нашей лаборатории Д.П. Криндачем и Д.Н. Клышко, использовавшими аргоновый лазер и кристалл  $\text{LiNbO}_3$ .

Мы признательны Д.Н. Клышко за полезные обсуждения результатов и И.А. Юзefович за помощь в измерениях.

Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
им. М.В. Ломоносова

Поступило в редакцию  
4 мая 1967 г.

#### Литература

- [1] С.А. Ахманов, Р.В. Хохлов. УФН, 88, 439, 1966.
- [2] С.А. Ахманов, А.И. Ковригина, Д.С. Пискарскас, Р.В. Хохлов.  
Письма ЖЭТФ, 2, 141, 1965.
- [3] I.P. Gordon, W.H. Louisell, L.R. Walker. Phys. Rev., 129, 481, 1963.
- [4] Д.Н. Клышко. Письма ЖЭТФ, 6, 490, 1967.

---

\* Предварительные результаты эксперимента были доложены на Симпозиуме по современной оптике, 22–24 марта 1967 г., Нью-Йорк, США.

\*\* Углы  $\theta_0$  (с индексом "о" внизу) соответствуют одномерным взаимодействиям.