

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 519.853.6

А. С. ЗАГОРУЙКО, Ю. В. ТРОИЦКИЙ
(Новосибирск)

**ПРОВЕРКА ЛИНЕЙНОСТИ
И ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДЕТЕКТОРОВ
ПРИ ПОМОЩИ СВЕТОФИЛЬТРОВ С НЕИЗВЕСТНЫМ ПРОПУСКАНИЕМ**

В связи с развитием квантовой электроники значительно повысились требования к точности измерений в оптической области спектра. Это относится, в частности, к амплитудным измерениям, которые обычно осуществляются с помощью фотоэлектрических детекторов (ФД). Регистрация интенсивности света при измерении малых коэффициентов усиления и поглощения в процессе исследования амплитудных и частотных характеристик лазеров и в ряде других случаев может потребовать точностей порядка десятых долей процента и меньше. При таких прецизионных измерениях многие старые методы проверки линейности ФД и построения их градуировочных характеристик оказываются непригодными. Среди новых методов, которые решают эту задачу, следует отметить метод [1], основанный на том, что при неизменной мощности P источника света проводится два отсчета фототока I , из которых первый делается без ослабления света, а второй — через ослабляющий светофильтр. Повторяя эти измерения при различных мощностях источника и сравнивая отношение фототоков для каждой пары отсчетов, можно найти характеристику $I(P)$ и оценить степень ее линейности. Существенно, что при этом коэффициент пропускания светофильтра может быть неизвестен до начала измерений, но предполагается, что фотодетектор имеет хотя бы небольшой линейный участок.

В работе [2] используются два источника света, и ФД освещается каждым источником по отдельности (отсчеты I_1 и I_2), а затем одновременно (отсчет I_3). Линейность проверяется по выполнению равенства $I_1 + I_2 = I_3$. Практическая реализация метода [2] несколько сложнее, чем [1]. В случае невыполнения условия линейности в обеих работах предлагается способ нахождения характеристики $I(P)$ на основе результатов измерений, причем искомая характеристика аппроксимируется полиномом второй степени.

В настоящем сообщении предлагается повысить точность аппроксимации характеристики ФД по сравнению с работами [1, 2] за счет увеличения числа членов аппроксимирующего полинома, численное определение которых становится возможным благодаря применению современных методов нелинейного программирования, реализованных на ЭВМ [3, 4]. Кроме того, в отличие от метода [1] для измерений используется не один, а два ослабляющих светофильтра с первоначально неизвестными коэффициентами пропускания, что позволяет уменьшить число измерений для получения заданной точности или же расширить охватываемый участок характеристики ФД.

Схема измерительной установки показана на рис. 1. Источником света является лазер 1 (нами использовался лазер типа ЛГ-79/2 с длиной волны 0,63 мкм). Фотодетектор 2 типа ФД-7К работал в фотогальваническом режиме без внешнего источника питания. Сопротивление нагрузки 470 Ом. Для выравнивания освещенности по приемной площадке ФД на расстоянии 5—6 мм перед ним устанавливалось матовое стекло 3. Напряжение U на нагрузке фотодиода измерялось цифровым микровольтметром ВК2-20. Для контроля мощности лазерного пучка часть его отводилась к вспомогательному фотодиоду, напряжение на выходе которого также измерялось цифровым вольтметром, и в случае необходимости вводились поправки. Все эти ме-

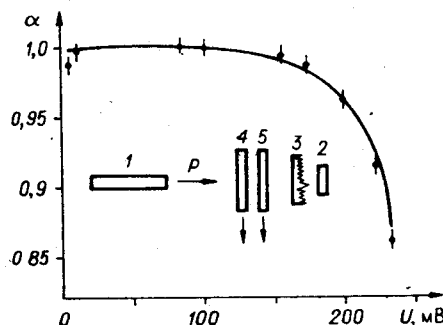


Рис. 1.

ры позволяли получить относительную точность отсчета фототока порядка 0,2—0,3%, за исключением области малых фототоков. Светофильтры 4 и 5 типа НС-7 и НС-6 могли устанавливаться на пути луча порознь и вместе, причем обращалось внимание на то, чтобы на всех этапах измерений луч света проходил через одно и то же место светофильтра и под одинаковым углом. Паразитные переотражения луча были выведены из рабочей зоны.

Измерения состояли в том, что при заданной мощности P лазера делалось 4 отсчета напряжения U на выходе фотодиода: без светофильтра (отсчет U_0), с первым светофильтром (U_1), со вторым светофильтром (U_2) и с двумя, введенными в пучок одновременно (отсчет U_3). При идеальной линейности характеристики ФД величина $\alpha = U_0 U_3 / U_1 U_2$ должна быть равна единице. Описанный цикл измерений, состоящий из четырех этапов, повторялся N раз для разных значений мощности лазера P_i , где $i = 1, 2, \dots, N$. Общее число контролируемых таким образом точек характеристики было равно $4N$ (в нашем случае $N = 9$).

На рис. 1 по горизонтальной оси отложены значения U_0 , по вертикали — значения α . Результаты измерений показаны отдельными точками с указанием среднего квадратичного разброса отсчетов. Видно, что в диапазоне U_0 от 10 до 100 мВ величина α очень близка к единице, как это должно быть при хорошей линейности. При малых и больших U_0 отклонения от линейности заметно увеличиваются.

Для нахождения характеристики ФД предположим, что зависимость $U(P)$ может быть аппроксимирована полиномом, содержащим целые степени P по пятую включительно:

$$U = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 + a_3 P^3 + a_4 P^4 + a_5 P^5. \quad (1)$$

Так как световая мощность P была измерена в относительных единицах, полагаем $a_1 = 1$. Коэффициент $a_0 = -0,03$ можно измерить непосредственно при закрытом луче лазера ($P = 0$). Задача заключается в определении a_2, a_3, a_4 и a_5 , а также T_1 и T_2 — коэффициентов пропускания светофильтров. Для четырех этапов i -го цикла измерений запишем:

$$\begin{aligned} U_{0i} &= a_0 + a_1 P_i + a_2 P_i^2 + a_3 P_i^3 + a_4 P_i^4 + a_5 P_i^5, \\ U_{1i} &= a_0 + a_1 T_1 P_i + a_2 (T_1 P_i)^2 + a_3 (T_1 P_i)^3 + a_4 (T_1 P_i)^4 + a_5 (T_1 P_i)^5, \\ U_{2i} &= a_0 + a_1 T_2 P_i + a_2 (T_2 P_i)^2 + a_3 (T_2 P_i)^3 + a_4 (T_2 P_i)^4 + a_5 (T_2 P_i)^5, \\ U_{3i} &= a_0 + a_1 (T_1 T_2 P_i) + a_2 (T_1 T_2 P_i)^2 + a_3 (T_1 T_2 P_i)^3 + a_4 (T_1 T_2 P_i)^4 + a_5 (T_1 T_2 P_i)^5. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, получается система из $4N$ уравнений относительно $6 + N$ неизвестных $T_1, T_2, a_2, a_3, a_4, a_5$ и P_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Для принятой аппроксимации при $N = 2$ можно найти единственное решение систем уравнений (2), но вид характеристики будет в этом случае определен по 8 точкам, что может оказаться недостаточным. В нашем случае при $N = 9$ (36 точек) имеется 15 оптимизируемых переменных. Для их определения был использован разработанный на языке ФОРТРАН на основе работ [3, 4] пакет программ для решения задач многомерной минимизации и систем нелинейных алгебро-трансцендентных уравнений.

Так как количество переменных меньше количества уравнений, имело смысл использовать метод наименьших квадратов. Подлежащая минимизации целевая функция ΔF определялась как отнесенная к количеству N циклов измерений сумма квадратов невязок ΔU_{ji} (разностей между левой и правой частями) уравнений полной системы:

$$\Delta F = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^4 (\Delta U_{ji})^2 \right]^{1/2} / N.$$

Аппроксимация характеристики $U(P)$ полиномом (1) осуществлялась реализованными в пакете релаксационными методами поиска (модифицированным методом Пауэлла, методом поворота системы координат Розенброка, методом Давидона — Флетчера — Пауэлла) [3] и комбинированным с покоординатным спуском обобщенным методом хорд [4]. Одномерная минимизация при определении шага спуска проводилась методом золотого сечения и скользящей параболы.

Двусторонние ограничения на вектор переменных выбирались исходя из $\pm 20\%$ -ного отклонения от задаваемых начальных значений переменных. Наилучшее решение ($T_1 = 0,442$; $T_2 = 0,694$; $a_2 = 1,921 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = -2,286 \cdot 10^{-8}$; $a_4 = 1,907 \cdot 10^{-9}$; $a_5 = -3,487 \cdot 10^{-11}$) с наименьшим значением целевой функции $\Delta F = 0,024$ устойчиво получалось для разных начальных векторов модифицированным методом Пауэлла. Полученная таким образом характеристика ФД показана на рис. 2, где по горизонтали отложены значения U в милливольтгах, по вертикали — падающая мощность света в относительных единицах.

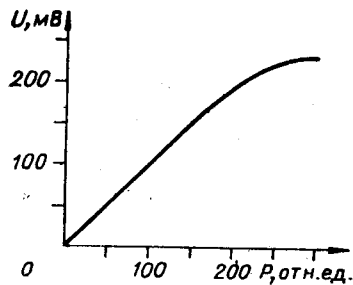


Рис. 2.

тельных единицах. Из характеристики $U(P)$ видно, что при $U \lesssim 100$ мВ она близка к линейной, затем начинается заметное насыщение. На рис. 1 сплошной линией показана зависимость $\alpha(U)$ вычисленная при помощи (1) с приведенными выше

ЛИТЕРАТУРА

1. Wall D. L., Manz A. W. Simple Technique for Characterizing Nonlinear Responsivity of Infrared Detectors.— Appl. Opt., 1980, vol. 19, p. 1569—1570.
2. Coslivi L., Righini F. Fast Determination of the Nonlinearity of Photodetectors.— Appl. Opt., 1980, vol. 19, p. 3201—3203.
3. Загоруйко А. С. Результаты сравнения релаксационных методов многомерной минимизации на ЭВМ.— Автометрия, 1979, № 5.
4. Загоруйко А. С. О комбинированных с обобщенным методом хорд способах многомерной минимизации.— Автометрия, 1980, № 5.

Поступило в редакцию 8 апреля 1981 г.

УДК 621.378

А. Я. ПАЮРОВ, В. А. ПЕРЕБЯКИН, Е. Г. ЧУЛЯЕВА
(Рязань)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ОДНОЧАСТОТНЫХ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ЛАЗЕРОВ

Одной из основных характеристик одночастотных стабилизированных лазеров является нестабильность частоты излучения. В работах [1, 2] рассмотрены флуктуации частоты излучения лазеров, характеризующие кратковременную нестабильность. Однако при решении задач прикладного характера большую роль играет долговременная нестабильность частоты. В статье [3] теоретически рассмотрены флуктуации частоты газового лазера, характеризующие долговременную нестабильность, но основное внимание все же уделено путям повышения кратковременной стабильности частоты.

Задача данной работы заключалась в исследовании спектра флуктуаций частоты излучения одночастотных стабилизированных лазеров с целью выявления возмущающих факторов и их роли в дестабилизации частоты за продолжительный промежуток времени (8 ч и более). Распространенным методом исследования спектра флуктуаций частоты является метод оптического гетеродинамирования [3—5] с последующим определением нестабильности частоты через среднеквадратическое отклонение (СКО). Это справедливо, если флуктуации частоты излучения носят случайный характер. Как правило, при изменении частоты лазерного излучения имеется детерминированная составляющая, мало заметная на фоне случайных флуктуаций частоты. Нестабильность частоты при этом может быть более строго определена с помощью параметра Аллена [6]. Зависимость параметра Аллена от времени усреднения позволяет обнаружить аperiodические составляющие в спектре возмущений [3]. Анализ периодических возмущений частоты излучения возможен с помощью автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция представляет собой более эффективное средство выявления детерминированных процессов, которые могут маскироваться случайным фоновым шумом. Для дискретной обработки автокорреляционная функция процесса записывается следующим образом [7]:

$$K_{\Omega}(t) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} \dot{\Omega}(t_i) \dot{\Omega}(t_{i+m}),$$

где n — число дискретных отсчетов, $t = m\Delta t$, t — текущее время, Δt — время усреднения, $m = 0, 1, 2, \dots$

В настоящей работе с помощью указанных методов исследовались флуктуации частоты серийно выпускаемого одночастотного стабилизированного лазера ЛГ-149-1. Частота лазерного излучения в этом приборе стабилизируется по центру линии поглощения в неоне-20 [8].

Измерения частоты биений двух одночастотных стабилизированных лазеров проводились на установке, аналогичной описанной в работе [5]. Для непрерывного измерения частоты биений использовались два частотомера, причем «мертвое» время