

06;07;08

Влияние частичной пространственной когерентности излучения инжекционного лазера на разрешение акустооптического спектроанализатора

© И.И. Саенко, А.О. Бардышев

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 10 сентября 1995 г.)

Введение

Одним из направлений совершенствования акустооптических процессоров является разработка малогабаритных, высокоэффективных, стабильных и долговечных источников когерентного излучения на основе полупроводниковых инжекционных лазеров. Однако такие особенности излучательных характеристик инжекционных лазеров, как частичная когерентность, спектр, форма волнового фронта и их сильная зависимость от условий применения, обуславливают необходимость оценки влияния упомянутых особенностей на параметры акустооптического процессора в целом и тщательного выбора режима его работы.

Среди акустооптических устройств важное место занимает наиболее простой и универсальный акустооптический фурье-процессор с пространственным интегрированием [1]. Разработанные на его основе анализаторы спектра с успехом применяются в устройствах обработки сигналов различного назначения в радиоастрономии, радиоразведке, системах связи, геофизике и т. д. [2].

При создании акустооптических спектроанализаторов инжекционные лазеры используются довольно давно (см., например, [3]), однако частичная когерентность излучения не позволяла реализовать частотное разрешение спектроанализаторов, достижимое с газовыми лазерами. Причем если влияние частичной временной когерентности на разрешение исследовано достаточно подробно [3–5], то оценки влияния частичной пространственной когерентности на параметры спектроанализаторов встречаются значительно реже [4]. Это обусловлено доминирующим влиянием на разрешение широкой линии излучения инжекционного лазера в режиме генерации нескольких продольных мод. В то же время быстрый прогресс в разработке более совершенных инжекционных лазеров, в частности полосковых лазеров на двойной гетероструктуре, привел к появлению серийных инжекционных лазеров, в которых реализован устойчивый одночастотный режим непрерывной генерации. При использовании лазеров такого типа в спектроанализаторах снимается ограничение разрешения, обусловленное шириной линии излучения. В этом случае может оказаться заметным влияние на разрешение

частичной пространственной когерентности, особенно если необходимо реализовать характеристики спектроанализатора, близкие к предельным.

Формулировка задачи

Как известно, разрешение акустооптического спектроанализатора может быть определено как полуширина его аппаратной функции [5]. Получим выражение для аппаратной функции фурье-процессора с частично пространственно когерентным источником. При этом необходимо отметить, что применение интеграла суперпозиции, ядром которого является аппаратная функция, правомерно лишь для функций, относительно которых система может рассматриваться как линейная. Для системы с частичной когерентностью такой функцией является функция взаимной когерентности [6]. С учетом малой ширины линии излучения инжекционного лазера в режиме генерации одной продольной моды справедливо квазимонохроматическое приближение, что позволяет ограничиться рассмотрением функции взаимной интенсивности [7]. Для простоты будем рассматривать одномерный случай. На рис. 1 представлена упрощенная схема расположения элементов оптического процессора и приведены обозначения координат.

Пусть на акустооптический модулятор (рис. 1) в виде апертуры D в плоскости xy падает сфокусированная коллиматором (LDC) квазиплоская квазигармоническая случайная волна с линейной поляризацией и гауссовым распределением амплитуды. Для такой волны, распространяющейся вдоль оси z , с комплексной амплитудой, зависящей только от x , функция взаимной интенсивности в точках x_1 и x_2 на оси x , имеет вид [8]

$$\Gamma(x_1, x_2) = \langle E(x_1)E^*(x_2) \rangle, \quad (1)$$

где угловые скобки означают усреднение по времени.

Для описания функции взаимной интенсивности коллимированного частично пространственно когерентного гауссова пучка воспользуемся моделью

Гаусса–Шелла [9]

$$\Gamma(x_1, x_2) = I_0 \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{r_i^2}\right) \exp\left(-\frac{(x_1 - x_2)^2}{r_c^2}\right), \quad (2)$$

где r_i — полуширина пучка по уровню $I_0 \exp(-2)$; r_c — параметр корреляции, смысл которого будет ясен из дальнейшего.

Причем оценить соответствие принятой модели функции взаимной интенсивности характеристикам реального коллимированного лазерного пучка можно, имея в виду, что [7]

$$\Gamma(x_1, x_2) = \sqrt{I(x_1)}\sqrt{I(x_2)}\gamma(x_1, x_2),$$

где $I(x) = \Gamma(x, x)$, $\gamma(x_1, x_2)$ — комплексная степень когерентности.

Как известно, при $I(x_1) = I(x_2)$ значения модуля степени когерентности равны отсчетам функции видности $V(x_1, x_2)$, измеряемой в интерференционном эксперименте (например, в интерферометре Юнга). Тогда с учетом (2)

$$V(x_1, x_2) = \exp[-(x_1 - x_2)^2/r_c^2], \quad (3)$$

$$I(x) = I_0 \exp(-2x^2/r_i^2). \quad (4)$$

Параметр корреляции r_c , как следует из (3), имеет смысл расстояния между точками в поперечном сечении пучка, на котором модуль степени когерентности уменьшается в e раз. Следовательно, параметры r_i и r_c могут быть определены при измерении зависимостей $I(x)$ и $V(x_1, x_2)$ на выходе коллиматора и аппроксимации их выражениями (3) и (4).

Теперь аппаратная функция процессора может быть получена как результат воздействия на (2) оператора системы при гармоническом сигнале на входе акустооптического модулятора. Отметим, что вычисляемая с помощью функции взаимной когерентности аппаратная функция имеет смысл энергетической аппаратной функции [10]. При этом полагая, что в первом приближении форма аппаратной функции не зависит от частоты сигнала, можно, так же как в [11], при вычислении аппаратной функции заменить акустооптический модулятор эквивалентной функцией окна. В простейшем случае можно ограничиться

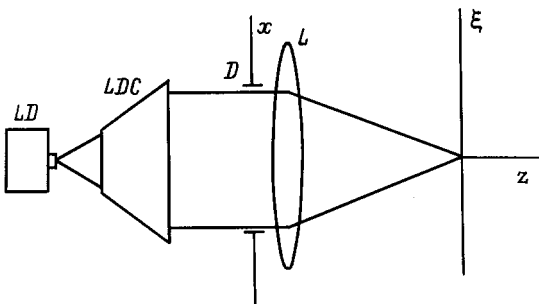


Рис. 1. Упрощенная схема фурье-процессора.

прямоугольной апертурной функцией вида

$$W(x) = \text{rect}(2x/D).$$

Тогда, считая, что фурье-преобразующая линза L расположена вплотную к плоскости xy (рис. 1), взаимную интенсивность в ее фокальной плоскости можно определить с помощью соотношения [12]

$$\Gamma(\xi_1, \xi_2) = \frac{1}{(\lambda F)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma'(x_1, x_2) \times \exp\left[-ik\frac{(\xi_1 - x_1)^2}{2F}\right] \exp\left[-ik\frac{(\xi_2 - x_2)^2}{2F}\right] dx_1 dx_2, \quad (5)$$

где λ — длина волны излучения лазера; F — фокусное расстояние линзы L ; $k = 2\pi/\lambda$, ξ_1, ξ_2 — координаты точки на оси в фокальной плоскости линзы; $\Gamma'(x_1, x_2)$ — функция взаимной интенсивности непосредственно за линзой.

Следуя [7] и учитывая (2) и (4), можно записать

$$\Gamma'(x_1, x_2) = \Gamma(x_1, x_2)W(x_1)W^*(x_2)I(x_1)I^*(x_2), \quad (6)$$

где

$$Tx = \begin{cases} \exp(-ix^2/2F), & |x| \leq D/2, \\ 0, & |x| > D/2. \end{cases} \quad (7)$$

Переходя к распределению интенсивности вдоль оси ξ в фокальной плоскости линзы, на основании (5)–(7) можно получить

$$I(\xi) = \Gamma(\xi, \xi) = \frac{1}{(\lambda F)^2} \int_{-D/2}^{D/2} \int_{-D/2}^{D/2} \Gamma(x_1, x_2) \times \exp[-ik\xi(x_1 - x_2)/F] dx_1 dx_2. \quad (8)$$

Введем переменные

$$u = \pi D\xi/\lambda F, \quad \nu = 2x/D \quad (9)$$

и, нормируя $I(u)$ на ее значение при $u = 0$, получим

$$H(u) = \frac{I(u)}{I(0)} = \frac{\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Gamma(\nu_1, \nu_2) \exp[-iu(\nu_1 - \nu_2)] d\nu_1 d\nu_2}{\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Gamma(\nu_1, \nu_2) d\nu_1 d\nu_2}. \quad (10)$$

Входящая в (10) функция взаимной интенсивности на входе акустооптического модулятора с учетом (2) и (9) может быть записана так:

$$\Gamma(\nu_1, \nu_2) = I_0 \exp[-(\nu_1^2 + \nu_2^2) \cdot T_i^2] \exp\left[-\frac{(\nu_1 - \nu_2)^2 T_c^2}{2}\right]. \quad (11)$$

Здесь T_i и T_c — параметры отсечки на краях апертуры входящих в (2) гауссоид

$$T_i = D/2r_i, \quad T_c = D/\sqrt{2}r_c. \quad (12)$$

Таким образом, выражения (10)–(12) определяют с учетом принятых приближений энергетическую аппаратную функцию фурье-процессора с частично пространственно когерентным источником; полуширина $H(u)$ (ширина по уровню 0.5 от максимума) дает оценку разрешения акустооптического спектроанализатора.

Результаты

Примеры рассчитанных по формулам (10)–(12) аппаратных функций акустооптического фурье-процессора приведены на рис. 2. Здесь кривая 1 соответствует значениям $T_i = 0$ и $T_c = 0$, т.е. представляет собой зависимость $\sin^2 u/u^2$ — энергетическую аппаратную функцию "идеального" спектроанализатора [9]. Для кривых 2 и 3 комбинации параметров отсечки соответственно таковы: $T_i = 0.776, T_c = 0$ и $T_i = 0, T_c = 0.776$, для кривой 4 — $T_i = T_c = 0.776$, что определяет парциальное спадание гауссоид, описывающих распределение интенсивности (4) и функции видности (3), на краях апертуры акустооптического модулятора до уровня 0.3 от максимальных значений.

На приведенных графиках выражено достаточно сильное влияние уменьшения пространственной когерентности пучка на форму аппаратной функции (кривая 3), приводящего к уширению главного максимума (для полуширины более чем на 15%) и заметному "замыванию нулей" исходного распределения. В то же время кривая 2 описывает известное распределение

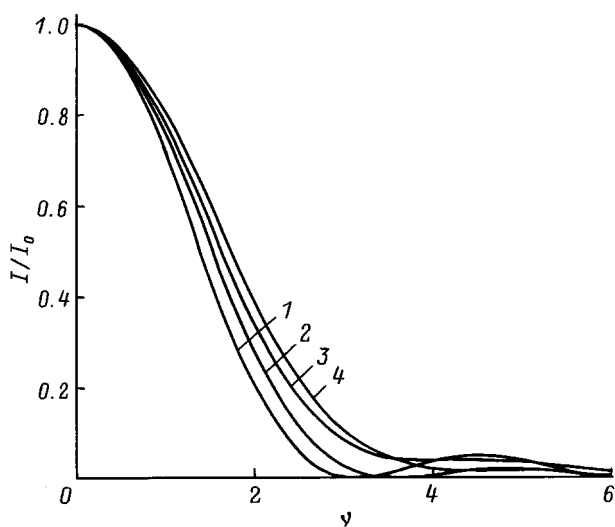


Рис. 2. Аппаратная функция акустооптического фурье-процессора для различных значений параметров отсечки.

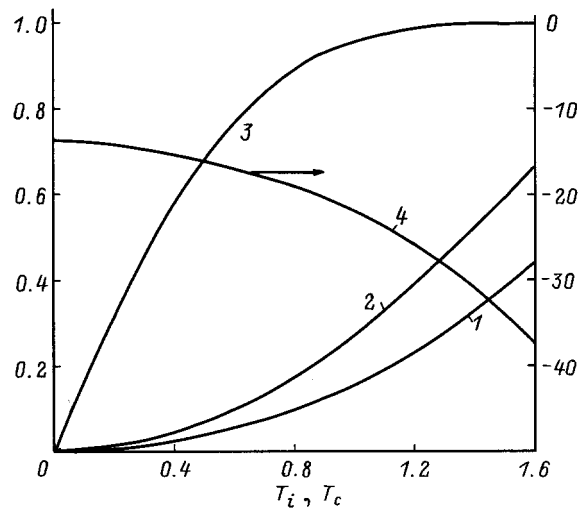


Рис. 3. Зависимость характеристик фурье-процессора от параметров отсечки. 1, 2 — уширение аппаратной функции при изменении T_i и T_c соответственно; 3 — коэффициент использования энергии пучка; 4 — максимальный уровень боковых лепестков аппаратной функции (в дБ).

[11] с уширением главного максимума (на величину около 10%) и спаданием уровня боковых лепестков.

С использованием полученных соотношений были рассчитаны парциальные изменения полуширины аппаратной функции, нормированной к полуширине при $T_i = 0, T_c = 0$, при независимом изменении параметров отсечки. Результаты расчета представлены кривыми 1 и 2 на рис. 3. Следует отметить, что оценка суммарного уширения должна производиться с учетом соотношения между значениями T_i и T_c , которое устанавливается исходя из особенностей излучательных характеристик конкретного типа лазера. При этом сами значения T_i и T_c определяются параметрами формирователя пучка. Так, по данным [4, рис. 35] при ширине диаграммы излучения инжекционного лазера в плоскости p - n -перехода по уровню $\exp(-2)$ от максимума $\Delta\theta \approx 20^\circ$ спадание функции видности составляет ~ 0.5 для ширины активной зоны полоскового гетеролазера $W \approx 3 \dots 5$ мкм. Таким образом, в этом случае $T_i = 1, T_c = 0.6$. Приближенное значение суммарного уширения аппаратной функции, как показывает расчет, может быть получено просто суммированием парциальных уширений, причем оценка превышает точное значение не более чем на 3% от полуширины исходной аппаратной функции. Например, для $T_i = 0.776, T_c = 0.776$ оценка составляет 25.4%, а точное значение 24.4%; соответствующие величины для $T_i = T_c = 1$ — 42.7 и 40%.

На рис. 3 приведены также зависимости используемой доли энергии гауссова пучка в одномерном сечении (кривая 3) и максимального уровня боковых лепестков в спектре усеченной гауссоиды (кривая 4) от параметра отсечки T_i .

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, уменьшение степени пространственной когерентности излучения к краям рабочей апертуры оказывает существенное влияние на уширение аппаратной функции фурье-процессора, превышающее при равных параметрах отсечки уширение за счет спада интенсивности. Верхняя оценка общего уширения аппаратной функции может быть получена суммированием парциальных уширений для соответствующих значений параметров отсечки.

Во-вторых, естественное стремление к эффективному использованию энергии лазерного излучения и к уменьшению уровня боковых лепестков аппаратной функции фурье-процессора, приводящее к необходимости увеличивать параметр отсечки T_i (рис. 3), может вызвать при определенных условиях увеличение параметра отсечки для модуля степени пространственной когерентности и соответствующее заметное уширение аппаратной функции. Именно такая ситуация характерна для излучения в плоскости волновода полосковых гетеролазеров с шириной полоска в несколько микрометров [4].

Таким образом, для достижения высокого спектрального разрешения в акустооптическом фурье-процессоре с одночастотным инжекционным лазером при выборе параметров формирователя лазерного пучка следует учитывать ограниченную пространственную когерентность излучения в плоскости p - n -перехода.

Список литературы

- [1] Терпин Т.М. Спектральный анализ сигналов оптическими методами // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 1. С. 92–108.
- [2] Opt. Eng. 1992. Vol. 31. N 10. Special Section on Acoustooptics.
- [3] Carter R.W., Willats T.F. // The Marconi Review. 1981. Vol. 44. N 220. P. 57–76.
- [4] Золотарев А.И., Калашников С.П., Кондратьев В.А., Морозов В.Н. // Тр. физического института им. П.М. Лебедева. 1987. Т. 185. С. 90–163.
- [5] Егоров Ю.В., Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические процессоры. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
- [6] Cathey W.T. Optical Information Processing and Holography. New York: Wiley & Sons, 1974. 398 p.
- [7] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
- [8] Ахманов С.А., Дьяков Ю.Б., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
- [9] Дьяков Ю.Б. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 11. С. 1068–1076.
- [10] Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова. М.: Радио и связь, 1989. 136 с.
- [11] Hecht D.H. // Opt. Eng. 1977. Vol. 16. N 5. P. 461–466.
- [12] Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 495 с.