

10.2;15

Двойной акустооптический монохроматор изображений с перестраиваемой шириной аппаратной функции

© М.М. Мазур, Ю.А. Судденко, В.Н. Шорин

ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений,
Московская обл., пос. Менделеево
E-mail: s-mmazur@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2013 г.

Разработан и создан двойной акустооптический монохроматор (АОМ) на кристалле парателлурита, у которого ширина аппаратной функции изменяется при помощи периодической линейно-частотной модуляции (ЛЧМ) управляющего ультразвукового сигнала. Исследована аппаратная функция АОМ при изменении управляющих параметров: величины девиации частоты, периода модуляции частоты, управляющей мощности. Созданный АОМ может быть эффективно использован для фильтрации и анализа спектральных изображений.

Спектральная фильтрация изображений широко используется для обнаружения, идентификации и визуализации объектов. Спектральные изображения могут быть получены или методом построчного построения спектрального изображения, или за счет спектральной фильтрации целого кадра. Второй вариант может быть реализован путем использования в качестве диспергирующего устройства акустооптического фильтра (АОФ) [1,2]. АОФ обладают рядом замечательных свойств, таких как быстрая перестройка на произвольную длину волны и отсутствие подвижных элементов, что позволяет эффективно решать вышеуказанные задачи. К числу недостатков АОФ можно отнести хроматические искажения изображения, а также ограниченный спектральный контраст, связанный с заметной долей проходящего вне полосы пропускания фильтра излучения ($\sim 20\%$). Обе эти проблемы частично устраняет двойной акустооптический монохроматор (АОМ), содержащий две одинаковые последовательно расположенные и развернутые на 180° акустооптические ячейки (АОЯ) [3,4]. Такой монохроматор компенси-

рует хроматические искажения изображения и существенно повышает спектральный контраст.

Еще одной важной проблемой спектральной фильтрации является малая величина оптического сигнала из-за узости полосы пропускания АОФ (2–6 nm). Поэтому для задач, связанных с малой освещенностью объекта, целесообразно расширение полосы пропускания. Как было показано ранее, расширение полосы удается обеспечить при помощи линейной частотной модуляции (ЛЧМ) ультразвука [5,6]. В данной работе разработан и создан двойной АОМ на неколлинеарных АОЯ из парателлуриита с ЛЧМ и проведены исследования его аппаратной функции.

Монохроматор был создан по схеме, описанной в [7]. Его особенность заключается в возможности работы в непрерывном режиме, для чего разработанная специальная система управления вырабатывает пилообразный (периодический линейно-частотно-модулированный) высокочастотный сигнал. Аппаратная часть системы управления выполнена на микросхеме прямого синтеза частоты AD 9954 с возможностью частотной модуляции сигнала в микросхеме микропроцессора AT91SAM7, который позволяет программно задавать во всем рабочем диапазоне амплитуду девиации частоты, период девиации частоты и профиль выходной мощности усилителя ВЧ-драйвера.

Схема дифракции света (рис. 1) в обоих АОЯ монохроматора предполагает, что каждый падающий световой луч пересекает участки ультразвуковой решетки, имеющие разный пространственный период. Благодаря этому на такой решетке дифрагируют световые волны разной частоты, что и обеспечивает уширение полосы пропускания. Ввиду сложности прямого расчета формы функции пропускания, при частотно-модулированной ультразвуковой решетке используют экспериментальные [5,6] или численные методы [8]. В отсутствие модуляции частоты полоса пропускания АОФ определяется дифракционным пределом и составляет $\Delta\lambda_0 = V^2 \Delta n F(\theta, \gamma) / f^2 L_i$, где V — скорость ультразвуковой волны, Δn — разность показателей преломления обыкновенно и необыкновенно поляризованных волн, f — частота ультразвуковой волны, L_i — ширина звукового пучка в направлении распространения светового пучка, $F(\theta, \gamma)$ — геометрический коэффициент (см., например, формулу 8.10 в работе [9]). При включении модуляции полоса определяется девиацией и достигает $\Delta\lambda = V \Delta n F(\theta, \gamma) \Delta f / f_0^2$, где Δf — девиация частоты, f_0 — средняя частота ультразвука. В эксперименте

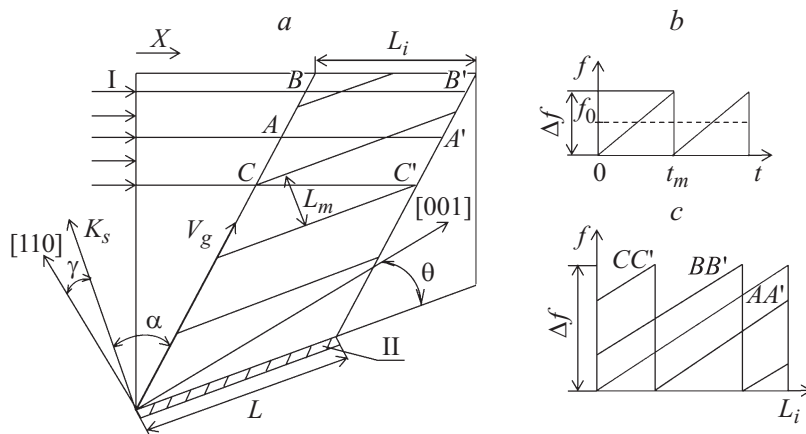


Рис. 1. Схема взаимодействия светового пучка в одной из АОЯ при ЛЧМ ультразвуковой волны. *a* — I — падающий световой пучок, II — ультразвуковой преобразователь, [110] и [001] — кристаллографические направления, L — длина ультразвукового преобразователя, L_i — длина взаимодействия, L_m — пространственный период модуляции частоты звуковой волны, K_s — волновой вектор звуковой волны, V_g — направление групповой скорости звуковой волны; *b* — временная зависимость частоты звуковой волны. Δf — амплитуда девиации частоты, f_0 — средняя частота, t_m — период модуляции; *c* — пространственное распределение звуковых частот на пути трех различных лучей в пределах падающего светового пучка при соотношении $t_m = t_0$ (1).

были получены различные формы аппаратной функции, некоторые из которых приведены на рис. 2. Представленные кривые были измерены с помощью дифракционного спектрометра с полосой пропускания 0.5 nm.

Как видно, при увеличении девиации частоты ширина аппаратной функции увеличивается, а коэффициент пропускания падает. Основной вопрос заключается в том, можно ли добиться увеличения светосилы, т.е. интегрального коэффициента пропускания, характеризующегося площадью кривой в пределах основного окна пропускания. Поскольку форма кривой и площадь меняются при изменении параметров модуляции, была исследована зависимость от периода модуляции t_m . При выборе периода модуляции следует учесть следующее. Для того чтобы на пути каждого луча света встречались участки со всеми периодами решетки,

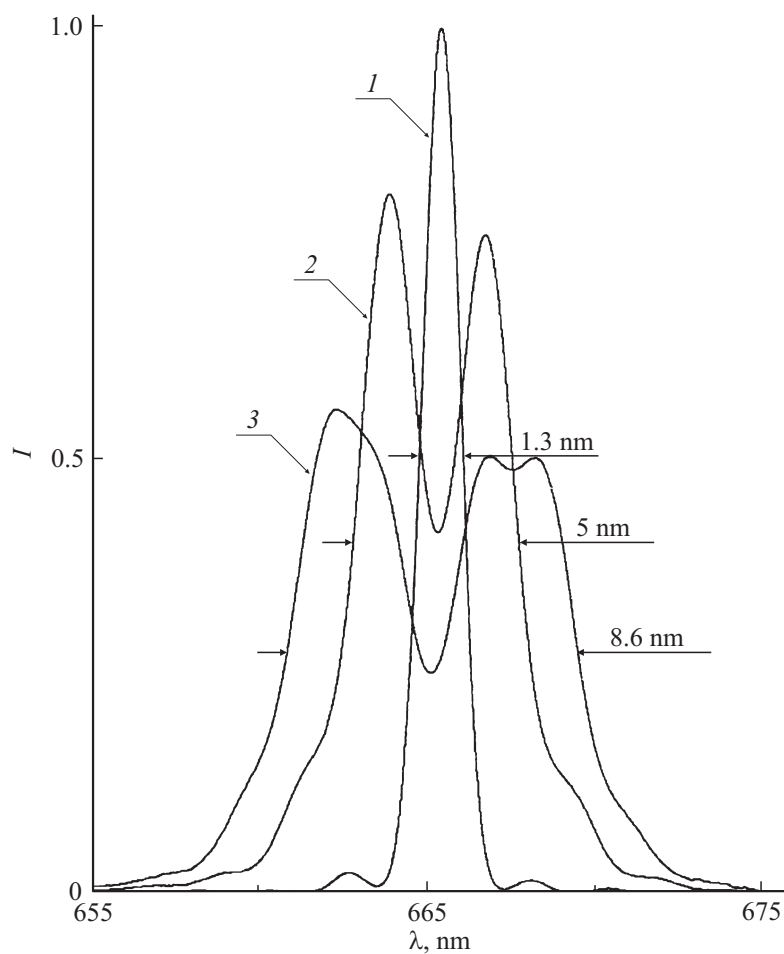


Рис. 2. Относительная величина I аппаратной функции АОМ, нормированная на величину максимума аппаратной функции без модуляции, при различных параметрах управляющего ультразвукового сигнала — девиации частоты Δf и ВЧ-мощности: 1 — $\Delta f = 0$, $P = 0.25$ W; 2 — $\Delta f = 1000$ kHz, $t_m \approx 3.6$ μ s, $P = 1$ W; 3 — $\Delta f = 1500$ kHz, $t_m \approx 3.6$ μ s, $P = 1$ W.

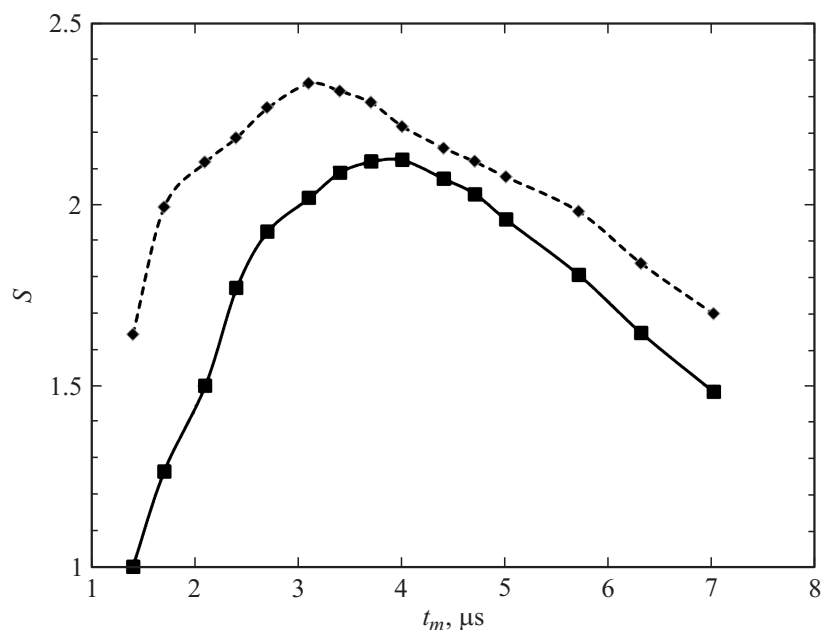


Рис. 3. Зависимость площади S аппаратной функции при ЛЧМ, нормированной на площадь аппаратной функции без модуляции, от периода модуляции t_m , для $P = 0.8$ W и амплитуды модуляции $\Delta f = 1000$ kHz (сплошная линия), $\Delta f = 1500$ kHz (пунктир).

период модуляции должен быть менее чем

$$t_0 = \frac{L \cos \alpha \times \sin(\theta - \gamma)}{V \cos(\alpha - \theta + \gamma)}, \quad (1)$$

где L — длина пьезопреобразователя, α — угол „сноса“ (угол между групповой и фазовой скоростями) ультразвукового пучка, θ и γ — углы, характеризующие направления распространения светового и ультразвукового пучков по отношению к кристаллографическим осям кристалла. При $t_m = t_0$ каждый участок пилообразной частотной развертки пересекается ровно 1 раз (рис. 1, *c*), причем это не зависит ни от момента времени, ни от положения луча. В созданном монохроматоре $\gamma = 7.1^\circ$, $\theta = 14.4^\circ$, $\alpha = 47^\circ$, а длины ультразвуковых преобразователей

первой и второй АОЯ немного различались $L_1 = 16 \text{ mm}$, $L_2 = 20 \text{ mm}$. При скорости звука $V = 6.9 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$ это дает оценку „оптимального“ периода $t_0 \approx 2.6 \mu\text{s}$ для первой ячейки и $t_0 \approx 3.3 \mu\text{s}$ для второй. Как показали измерения (рис. 3), при фиксированной мощности ультразвука и фиксированной девиации частоты максимальная площадь окна пропускания имела место при периоде модуляции $t_m \approx 3.2\text{--}3.8 \mu\text{s}$, что примерно совпадает с расчетной величиной t_0 .

При девиации частоты $\Delta f = 1500 \text{ kHz}$, периоде $t_m \approx 3.2 \mu\text{s}$ и максимальной мощности, которую позволял выдавать ВЧ-усилитель (суммарно 1 W на две АОЯ), площадь окна пропускания выросла примерно в 3 раза по отношению к немодулированному возбуждению при том, что ширина аппаратной функции выросла в 6 раз (кривая 3 на рис. 2). При этих параметрах достигнута величина пропускания около 50% от максимума пропускания без девиации частоты, что соответствует коэффициенту дифракции 70% для каждой АОЯ. Можно ожидать, в том числе опираясь на расчеты для коллинеарного ЛЧМ АОФ [8], что при увеличении мощности можно достичь и большей величины коэффициента дифракции.

Таким образом, проведенные исследования показали, что такой двойной ЛЧМ АОМ позволяет эффективно управлять шириной аппаратной функции, обеспечивая повышение светосилы (как минимум в 3 раза). Это важно для увеличения скорости регистрации спектральных изображений или регистрации спектральных изображений объектов с малой яркостью.

Авторы выражают благодарность В.Э. Пожару за интерес к работе и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Анчуткин В.С., Бельский А.Б., Волошинов В.Б., Юшков К.Б. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 8. С. 29–35.
- [2] Мазур М.М., Шорин В.Н., Епихин В.М., Судденко Ю.А., Кияченко Ю.Ф., Мазур Л.И., Пальцев Л.Л. // Научно-техническая конференция „Гиперспектральные приборы и технологии“. Тез. докл. 17–18 января 2013, Красногорск. С. 35–38.
- [3] Мазур М.М., Пожар В.Э., Пустовойт В.И. // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 10. С. 19–30.
- [4] Мачихин А.С., Пожар В.Э. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 10. С. 101–108.

- [5] *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я., Пономарев И.П.* // *Опт. и спектр.* 1984. Т. 56. В. 4. С. 736–739.
- [6] *Палавандашвили Л.С., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Шорин В.Н.* // Тез. докл. XIII Всес. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Черновцы-1986. Ч. 1. С. 229–230.
- [7] *Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Мазур М.М., Шорин В.Н.* Двойной акустооптический монохроматор: Патент РФ, № 2242779 от 11.03.2003.
- [8] *Пустовойт В.И., Табачкова К.И., Пожар В.Э.* // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. „Приборостроение“.* Спец. вып. „Современные проблемы опто-техники“. 2011. С. 228–234.
- [9] *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* *Физические основы акустооптики.* М.: Радио и связь, 1985.