

УДК 535.417, 681.787

АДАПТИВНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ ЗАРЯДОВЫХ РЕШЕТОК В ЗАДАЧАХ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

М. А. Брюшинин¹, И. А. Соколов¹, И. Н. Завестовская^{2,3}, Ю. Н. Кульчин^{3,4}

В работе исследуется возбуждение нестационарной фотоэДС частотно-модулированным светом в адаптивном фотоприемнике на основе GaAs. Для наблюдения эффекта кристалл освещается двумя пучками света с относительным сдвигом частоты $\Delta f(t)$. В экспериментах используется линейная частотная модуляция: $\Delta f(t) = At$. В результате такого освещения в кристалле возникает импульсный электрический сигнал. Появление импульса происходит при замедлении движения интерференционной картины, а его длительность определяется скоростью изменения частоты A и временем формирования решетки заряда. Показана возможность использования эффекта в системах измерения скоростей и ускорений движущихся объектов.

Ключевые слова: адаптивный фотоприемник, нестационарная фотоэДС.

Интерференционные методы обладают высокой чувствительностью и позволяют бесконтактным образом осуществить исследование различных объектов [1]. Для успешного применения этих методов необходимо в течение продолжительного времени поддерживать оптимальную рабочую точку интерферометра и с высокой точностью обеспечивать совпадение волновых фронтов интерферирующих лучей. Один из способов

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: mb@mail.ioffe.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

³ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

⁴ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5.

решения перечисленных проблем появился с открытием нестационарной фотоэдс, возбуждаемой на динамических зарядовых решетках [2]. Эффект нестационарной фотоэдс заключается в возникновении электрического тока в образце, освещаемом движущейся интерференционной картиной.

Обычно для возбуждения нестационарной фотоэдс используется синусоидальная фазовая модуляция одного из лучей. При этом интерференционная картина становится колеблющейся, а в адаптивном фотоприемнике появляется переменный электрический ток [2]. В данной работе мы осуществим линейную частотную модуляцию (ЛЧМ) интерферирующих пучков света и изучим особенности нестационарной фотоэдс при таком освещении. Так как частотная модуляция света может, в частности, возникать вследствие эффекта Доплера, будет рассмотрена возможность использования адаптивных фотоприемников в системах измерения скоростей и ускорений движущихся объектов.

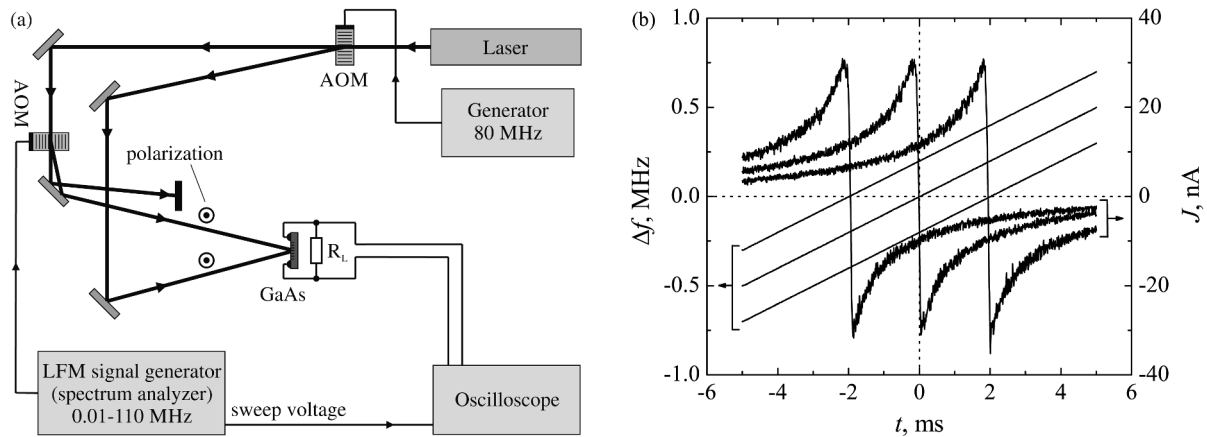


Рис. 1: Экспериментальная установка для исследования нестационарной фотоэдс, возбуждаемой частотно-модулированным светом (а). Осциллограммы сигнала нестационарной фотоэдс, измеренные при различных начальных сдвигах частоты (б).

Экспериментальная установка для исследования сигнала нестационарной фотоэдс представлена на рис. 1. Свет He-Ne лазера ($\lambda = 633 \text{ nm}$, $P_{\text{out}} \simeq 30 \text{ mW}$) проходит через два акустооптических модулятора МЛ-201-1, которые создают частотные сдвиги f_0 и $f_0 + \Delta f(t)$ в продифрагировавших лучах ($f_0 = 80 \text{ MHz}$). Выход спектроанализатора СК4-59, имеющего широкий диапазон изменения частоты, используется как источник электрического ЛЧМ сигнала. Далее пучки света направляются на адаптивный фотоприемник, формируя интерференционную картину со средней интенсивностью $I_0 = 240 \text{ mW/cm}^2$, контрастом $m = 0.97$ и пространственной частотой $K = 190 \text{ mm}^{-1}$.

В качестве адаптивного фотоприемника мы выбрали полуизолирующий кристалл арсенида галлия. Образец имеет размеры $3 \times 3 \times 0.5$ mm, передняя и задняя поверхности 3×3 mm отполированы до оптического качества. Electroдами служат две золотые полосы, напыленные на передней поверхности на расстоянии 1 mm друг от друга.

На рис. 1 представлены осциллограммы частотного сдвига (разности частот модуляции сигнального и опорного лучей) и сигнала нестационарной фотоэдс, измеренные при скорости развертки $A = 10^8$ Hz/s. Из приведенных зависимостей следует, что появление импульсов, сопровождающееся сменой полярности сигнала, происходит в моменты, когда $\Delta f \simeq 0$, то есть когда интерференционная картина останавливается. Изменение начальной частоты развертки спектроанализатора на ± 0.2 MHz приводит к сдвигу импульса во времени на ± 2 ns, т.е. существует взаимно-однозначное соответствие между изменением начального сдвига частот интерферирующих лучей и задержкой появления импульса: $\delta f_0 = A\delta t_0$.

При увеличении скорости изменения частоты наблюдается уменьшение длительности импульса нестационарной фотоэдс, при этом его амплитуда и форма остаются почти неизменными. В данной работе мы оценили длительность импульса по величине временного интервала между максимальным положительным и отрицательным значениями фотоэдс: $t_{p-p} = 2.65$ ns для $A = 10^7$ Hz/s и $t_{p-p} = 0.265$ ns для $A = 10^8$ Hz/s. Таким образом, в эксперименте реализуется зависимость вида $t_{p-p} = (\pi A \tau_{sc})^{-1}$, где $\tau_{sc} = 12$ μ s – время формирования решетки поля пространственного заряда.

Рассмотрим возможность использования адаптивных фотоприемников на основе нестационарной фотоэдс в задачах измерения скоростей и ускорений. Доплеровский сдвиг частоты света, отраженного от объекта, движущегося со скоростью $v(t) = v_0 + at$, равен $f(t) = 2v(t)/\lambda_L$. Постоянный частотный сдвиг f_0 и скорость изменения частоты A очевидным образом связаны со скоростью v_0 и ускорением a : $f_0 = 2v_0/\lambda_L$, $A = 2a/\lambda_L$. Рабочий диапазон акустооптических модуляторов составляет $f_0 = 80 - 120$ MHz. Это означает, что даже в схеме измерителя скорости, где частотная модуляция одного из лучей создается движущимся объектом, а другого – нашим акустооптическим модулятором, возможно измерение скорости в пределах $|v_0| = 25 - 38$ m/s. Но можно использовать более сложную схему, в которой акустооптические модуляторы стоят в обоих интерферирующих лучах (рис. 1), и за счет эффекта, аналогичного гетеродинарному сигналу, можно сдвинуть диапазон измеряемых частот (скоростей) в область как меньших, так и больших значений. В нашей работе мы использовали два одинаковых модулятора, создающих два примерно одинаковых “антистоксовых” сдвига частоты.

Разность частот варьировалась в пределах $|\Delta f| = 0 - 10$ МГц, что в схеме измерителя скорости соответствовало бы диапазону скоростей $|v_0| = 0 - 3$ м/с. В экспериментах мы задали скорость изменения частоты в пределах $A = 0 - 1000$ МГц/с. Эти значения соответствуют диапазону ускорений $a = 0 - 300$ м/с².

В работе исследовано детектирование оптических частотно-модулированных сигналов с использованием адаптивных фотоприемников на основе эффекта нестационарной фотоэдс, а также показана возможность их использования в задачах измерения скоростей и ускорений. Отличительной особенностью данного способа измерения является то, что скорость и ускорение могут быть оценены путем детектирования одиночного импульса, что особенно важно при исследовании быстропротекающих процессов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 15-12-00027).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко, *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике* (СПб., Наука, 1992).
- [2] S. I. Stepanov, I. A. Sokolov, G. S. Trofimov, et al., *Opt. Lett.* **15**, 1239 (1990).

Поступила в редакцию 16 декабря 2015 г.