

чивость. Например, при размерах объекта 16×16 элементов и уровнях шума в кадре 20 и 30 % вероятность ошибки определения смещения составляет соответственно 0 и 5 % (без выполнения предварительной фильтрации изображения — соответственно 10 и 20 % [1]).

Экспериментально нами опробованы элементы такого фильтра, соответствующие фильтрации по вертикали, горизонтали или диагонали для объекта размером 2×3 в кадре 4×4 элемента. Они очистили изображение от зашумленных фрагментов. Набор таких устройств позволяет оптимизировать процесс фильтрации в зависимости от размеров и формы изображения в кадре.

Таким образом, использование волоконно-оптических линий задержки и активных кольцевых структур значительно расширяет функциональные возможности ВОСВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логинов А. В., Меш М. Я., Очичников П. М. и др. Волоконно-оптический специализированный вычислитель для определения смещения поступательно движущегося объекта // Автометрия.— 1989.— № 1.
2. Розенфельд А. Распознавание изображений // ТИИЭР.— 1981.— 69, № 5.
3. Сарнадский В. И. Использование рекуррентного цифрового фильтра при обработке голографических изображений // Голографические измерительные системы/Под ред. А. Г. Козачка.— Новосибирск: ЦЭТИ, 1980.

Поступило в редакцию 10 марта 1988 г.

УДК 53.082.5 : 534.23

Х. Т. АБЕЙНАЯКЕ, В. А. КОМОЦКИЙ, М. В. КОТЮКОВ
(Москва)

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ОПОРНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Метод оптического зондирования с опорной дифракционной решеткой (ОДР), ранее описанный в [1—4], может быть применен для измерения скорости распространения поверхностных акустических волн (ПАВ). Схема зондирования представлена на рис. 1. Фотодетектор располагается в 0-м либо ± 1 -м порядке дифракции. Для измерения используется перемещаемая составляющая тока фотодетектора на частоте ПАВ F . Амплитуда полезного сигнала $i_m^{(F)}$ линейно связана с амплитудой ПАВ, а фаза φ определяется фазой ПАВ и фазой ОДР в точке зондирования [3, 4]. Под точкой зондирования будем понимать центр поперечного сечения зондирующего оптического пучка.

Описываемая методика позволяет с помощью данной схемы определить скорость распространения ПАВ. Пусть в схеме зондирования ОДР с известным периодом Λ жестко связана со звукопроводом и находится на расстоянии $l \ll \Lambda^2/\lambda$ от него. Если перемещать точку зондирования в направлении распространения ПАВ, то в случае точного совпадения длины ПАВ $\Lambda_{ПАВ}$ с периодом ОДР Λ фаза полезного сигнала при перемещении не меняется. Подстраивая частоту ПАВ и контролируя фазу сигнала, достигают выполнения равенства $\Lambda_{ПАВ} = \Lambda$ и по найденной таким образом $\Lambda_{ПАВ}$ рассчитывают скорость волны $V = F\Lambda_{ПАВ}$.

Можно использовать и другую методику, которая не требует точной подстройки частоты ПАВ. Пусть $\Lambda_{ПАВ}$ несколько отличается от Λ , т. е. $\Lambda_{ПАВ} = \Lambda + \delta\Lambda$, где $\delta\Lambda \ll \Lambda$. При перемещении зондирующего пучка в направлении распространения ПАВ на расстояние L фаза ПАВ в точке зондирования изменится на

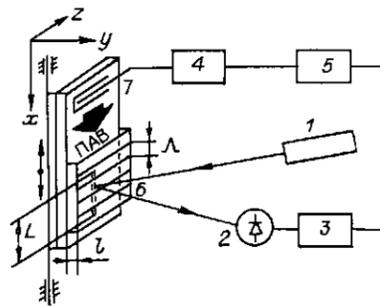


Рис. 1. Схема оптического зондирования с опорной дифракционной решеткой:
1 — лазер, 2 — фотодиодный узел, 3 — усилитель, 4 — генератор, 5 — фазометр, 6 — ОДР, 7 — звукопровод

величину $\delta\varphi_1 = [2\pi/(\Lambda + \delta\Lambda)]L$, а фаза опорной решетки — на $\delta\varphi_2 = [2\pi/\Lambda]L$. В результате фаза полезного сигнала получает приращение $\delta\varphi = \delta\varphi_2 - \delta\varphi_1 \approx (2\pi/\Lambda) \times \times (\delta\Lambda/\Lambda)L$, откуда

$$\delta\Lambda = (\Lambda^2/2\pi L)\delta\varphi; \quad (1)$$

$$V = F[\Lambda + (\Lambda^2/2\pi L)\delta\varphi]. \quad (2)$$

В процессе эксперимента измеряем величины F , L , $\delta\varphi$. Период опорной решетки определяется заранее.

Оценим ошибки измерения за счет погрешностей величин, входящих в формулу (2). Погрешность определения частоты считаем пренебрежимо малой, поскольку при использовании синтезатора частот относительная ошибка установки и измерения частоты $\Delta F/F = 10^{-8}$ на несколько порядков меньше ошибок, обусловливаемых другими факторами.

При оценке погрешности измерений за счет ошибки периода эталонной решетки следует учитывать, что измерение величин $\delta\varphi$, $\delta\Lambda$ и в конечном счете V здесь проводится не по одному периоду, а по большой группе последовательно расположенных периодов решетки и в качестве значения величины Λ берется средний период решетки, определяемый как отношение длины отрезка, содержащего N штрихов, к числу штрихов решетки в этом отрезке. Соответственно, если положение отдельного штриха определим с точностью Δx , то относительная точность нахождения среднего периода решетки составит $\Delta x/N\Lambda$, что при $\Delta x = 1$ мкм, $N = 100$, $\Lambda = 100$ мкм даст относительную точность 10^{-4} . Для оценки Δx возьмем величину, с которой при существующей технологии можно воспроизвести положение штрихов решетки с использованием процесса фотолитографии. Эта точность не является предельной или труднодостижимой. Заметим также, что точность измерений координат штрихов на приборах — измерителях координат фотошаблонов — значительно выше и достигает 0,01 мкм, так что с точки зрения метрологического обеспечения существует возможность снижения погрешности измерений по мере совершенствования технологии изготовления опорной решетки.

Относительную ошибку $\Delta V/V$ за счет неточностей измерения величин L и $\delta\varphi$, входящих во второе слагаемое, можно оценить, пользуясь формулой $(\Delta V/V) = (\Lambda/2\pi L)\Delta\delta\varphi + (\delta\varphi/2\pi L^2)\Delta L$. При $\Lambda = 100$ мкм, $L = 10$ мм, $\Delta L = 10$ мкм, $\Delta\delta\varphi = 0,5$ имеем $\Delta V/V = 10^{-5}$. Таким образом, оценка прямых ошибок измерения, входящих в расчетную формулу (2), показывает, что точность измерения порядка 10^{-4} может быть обеспечена при использовании существующих приборов. Следует заметить, что модель, принятая для вывода формулы (2), упрощена и могут существовать другие источники ошибок, которые не следуют из (2). Ряд таких ошибок оценим ниже.

Ошибка из-за формы волновых фронтов. Реальная форма волновых фронтов отличается от линейной вследствие эффектов дифракции и за счет дефектов подложки. Наиболее линейные участки лежат против центральной части возбудителя ПАВ [5]. При постановке измерений скорости ПАВ следует предварительно провести измерение формы фазовых фронтов волны и определить среднеквадратические отклонения формы фронта от прямой линии. От качества подложки зависит планируемая точность измерений. Так, например, ранее было показано [5], что небольшое остаточное пятно металла на пути ПАВ может дать значительный, в десятки градусов, скачок фазы на фазовом распределении ПАВ. Относительная погрешность измерения скорости $\Delta V/V$ будет определяться отношением отклонения фазового фронта σ_φ к полному набегу фазы волны на длине сканирования $\varphi_L = (2\pi/\Lambda)L$. Для получения $\Delta V/V = 10^{-4}$ при $\Lambda = 100$ мкм и $L = 10$ мм необходимо иметь волновые фазовые фронты с отклонением от линейности $\sigma_\varphi = 3,6^\circ$, что представляется реальным на основании предыдущего опыта. Заметим, что фаза выходного сигнала определяется усредненной фазой волнового фронта в пределах площади зондирующего оптического пучка. Эффективный размер его обычно составляет от нескольких единиц до нескольких десятков длин волн ПАВ. Так как при измерении скорости ПАВ не ставится задача получения высокой разрешающей способности измерения фазового распределения ПАВ, как, например, в [4, 5], размер пучка можно увеличить до нескольких десятков длин волн, что снизит фазовую ошибку вследствие усреднения неоднородностей фазового фронта и облегчит пространственную фильтрацию дифракционного порядка.

Оценим ошибки, обусловленные неточностью настройки экспериментальной установки, и прочие ошибки. Непараллельность штрихов ОДР фазовым фронтам волны приводит к изменению периода ОДР в направлении распространения ПАВ на величину $\Delta\Lambda/\Lambda = (1/\cos\alpha - 1) \approx \alpha^2$, где α — угол между штрихами ОДР и волновыми фронтами ПАВ. На практике выставляем параллельность штрихов ОДР штырям ВШП с точностью по α лучше 10^{-2} путем совмещения дифракционных картин от решетки и штырей ВШП, что обеспечивает $(\Delta\Lambda/\Lambda) < 10^{-4}$.

Иные источники ошибок, например кривизна подложки, прецессия лазерного излучения, отклонение линии сканирования от направления ПАВ, также были проанализированы, однако их вклад оказался меньше, чем вклад за счет факторов, рассмотренных выше. Таким образом, проведенные оценки показывают, что вполне достижима такая ситуация, когда относительные ошибки, связанные с оптико-акустической частью схемы измерений, не превышают 10^{-4} . С другой стороны, неста-

Рис. 2. Зависимости фазы от координаты x , измеренные на одном и том же образце при различных частотах ПАВ

бильность электронной схемы в течение всего эксперимента находилась в пределах разрешающей способности фазометра ($\pm 0,1^\circ$) и не являлась определяющей в суммарной ошибке эксперимента. Экспериментальное испытание метода проводилось на образце кристаллического кварца y -среза с пленкой из алюминия толщиной 80 нм на поверхности распространения ПАВ. Зондирование осуществлялось гелий-неоновым лазером ЛГ-52-1. В эксперименте использовались ПАВ с частотами $F = 31,40; 31,46; 31,56; 31,62$ МГц, которые задавались синтезатором частот Ч6-31 с относительной погрешностью установки частоты 10^{-8} . Длина отрезка сканирования $L = 6$ мм при полной длине решетки 10 мм. Средний период решетки 100 мкм. Максимальное отклонение периода решетки, измеренное на приборе для определения координат фотошаблонов, 1,57 мкм. Средняя величина периода определялась по длине 100 периодов решетки как L/N .

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости фазы от координаты. Путем статистической обработки с использованием линейной регрессии были найдены значения наклона прямых $\varphi(x)$ и среднеквадратические отклонения фазы от линейного закона σ_φ , которые оказались равными $\sigma_\varphi = 3^\circ$. Именно эти отклонения, а не погрешность фазометра ограничили инструментальную точность измерений. Отношение величины σ_φ к полному набегу фазы на траектории измерений составляет $1,4 \cdot 10^{-4}$, что близко к планируемой относительной точности определения скорости ПАВ $\Delta V/V = 10^{-4}$. Случайные отклонения фазы от линейного закона, наблюдаемые на рис. 2, в значительной мере обусловлены отклонениями положения отдельных штрихов дифракционной решетки от идеального периодического расположения. Вместе с тем определенный вклад в флуктуации фазы вносится за счет механических нестабильностей и неоднородностей системы перемещения подложки и, возможно, вследствие упомянутых выше неоднородностей формы фазовых фронтов ПАВ.

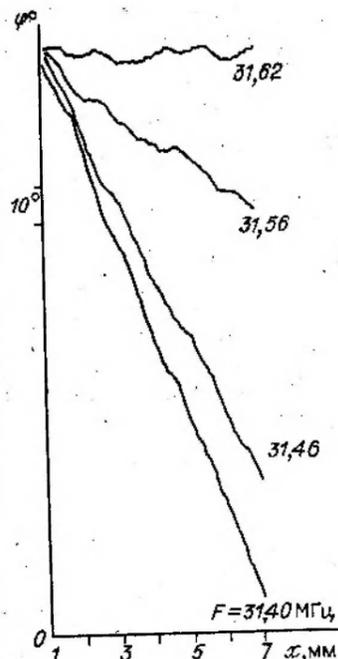
По данным эксперимента были рассчитаны значения скорости ПАВ:

F , МГц	31,40	31,46	31,56	31,62
V , м/с	$3162,6 \pm 0,5$	$3162,3 \pm 0,5$	$3162,9 \pm 0,5$	$3162,3 \pm 0,5$

Полученные величины хорошо согласуются со справочными данными скорости ПАВ на поверхности кристалла кварца y -среза в x -направлении (V_{yx}), если учесть поправку к скорости ΔV_{yx} , вызванную металлизацией поверхности образца. Суммарная справочная величина составляет $V_{yx} + \Delta V_{yx} = 3159 + 3,6 = 3162,6$ [м/с]. В качестве доверительного интервала приведено значение $\Delta V = 0,5$ м/с, полученное как $(\sigma_\varphi/\Phi_x) V_{yx}$, где Φ_x — полный набег фазы на длине траектории измерений, равный $(2\pi/\lambda)L = 2,16 \cdot 10^4$ град.

Проведенные первые эксперименты позволили отработать технику измерений и дали хорошую воспроизводимость результатов. Дальнейшее совершенствование метода в первую очередь связано с повышением качества опорной дифракционной решетки. Уменьшение среднеквадратического отклонения положения штрихов до 0,1 мкм позволит достичь относительной точности измерений порядка 10^{-4} при меньшей длине сканирования ($L \sim 1$ мм). Это даст возможность регистрировать небольшие локальные изменения скорости ПАВ на коротком участке траектории, а также проводить с высокой точностью измерения при наличии большого затухания ПАВ, поскольку для этого потребуются весьма малая протяженность звукопровода.

Предложенный метод не требует больших мощностей ПАВ, что следует из анализа чувствительности схемы измерений, приведенного в [3]. Он достаточно прост в реализации, по крайней мере при частотах ПАВ от единиц до ста мегагерц, и позволяет проводить измерения на различных материалах, в том числе на пьезоэлектриках, причем поверхность звукопровода можно не металлизировать. К недостаткам метода следует отнести необходимость замены опорной решетки при значительном изменении рабочей частоты ПАВ. Метод может оказаться полезным для контроля подложек, применяемых в технике ПАВ.



ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Явления при дифракции оптической волны с движущейся пространственной фазовой модуляцией на фазовых стационарных решетках // Оптика и спектроскопия.— 1980.— 49, № 1.
2. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Оптическое зондирование поверхностных акустических волн в присутствии стационарной периодической решетки // Там же.— № 2.
3. Komotskii V. A., Black T. D. Analysis and application of stationary reference grating method for optical detection of surface acoustic waves // J. Appl. Phys.— 1981.— 52, N 1.— P. 129.
4. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Измерение фазовых распределений поверхностных акустических волн методом оптического зондирования с опорой дифракционной решеткой // Автометрия.— 1982.— № 5.
5. Bessonov A. F., Black T. D., Deryugin L. N. et al. Theory, experimental realization and applications of SAW optical probing with diffractive reference gratings // Proc. of the Internat. Symposium Surface Waves in Solids and Layered Structures.— Novosibirsk, USSR, 1986.— V. II.— P. 202.

Поступило в редакцию 26 июня 1987 г.

УДК 621.378.3

С. Г. СТРУЦ, М. Ф. СТУПАК
(Новосибирск)

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ОБЛАСТИ 694,3 НМ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЯМЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Методы внутрирезонаторной спектроскопии с использованием твердотельных лазеров позволили с высоким разрешением зарегистрировать в исследуемых веществах слабые пики поглощения в областях линий люминесценции неодимовых стекол [1—3] и кристаллов рубина [4, 5]. Однако получение детальной зависимости поглощения исследуемого вещества от длины волны требует усложнения экспериментальной установки (скоростная регистрация спектра, использование многопроходной камеры внутри резонатора, сканирование частоты генерации) [3, 5].

В настоящей работе приведены результаты исследования возможностей одного из способов внутрирезонаторного выявления такой зависимости в области длины волны генерации лазера на рубине без прямой регистрации спектра. Данный способ основывается на факте пропорциональной зависимости пороговой энергии накачки от линейных потерь. В резонатор рубинового лазера, работающего в режиме свободной генерации, вводится исследуемое вещество. Внутри резонатора полностью устраняется паразитная селекция. Затем измеряется пороговый уровень накачки для различных значений температур жидкости, охлаждающей активный элемент. Разным температурам соответствуют различные длины волн генерации, так как при изменении температуры смещается длина волны максимума линии усиления рубина. Полученный график зависимости потерь от температуры «холодного» (термически уравновешенного с охлаждающей жидкостью) рубина пересчитывается в зависимость коэффициента поглощения исследуемого вещества от длины волны. Этот пересчет выполняется с помощью калибровки и с учетом монотонного уменьшения сечения лазерного перехода при увеличении температуры рубинового стержня. Несмотря на простоту идеи, реализация данного способа возможна при выполнении определенных условий. Во-первых, нужна большая точность в измерении температуры охлаждающей жидкости и энергии накачки, стабильность их от импульса к импульсу. Во-вторых, необходима узкая линия генерации, что в отсутствие частотной селекции в резонаторе для припорогового режима возможно только при использовании высококачественного рубинового стержня и конструкции лазерной головки, обеспечивающей равномерную инверсную населенность активного элемента. Все это сводит к минимуму такие искажающие результат факторы, как уплощение контура усиления и, следовательно, уширение спектра и «затягивание» частоты генерации к центру контура, наличие неконтролируемой тепловой линзы внутри резонатора, неравномерное изменение длины активного элемента по сечению, меняющееся, наряду с тепловой линзой, параметры резонатора. Температура рубина в момент генерации отличается от температуры охлаждающей жидкости из-за нагрева его излучением накачки. С ростом энергии накачки такое различие увеличивается. Измерение высоких уровней поглощения в исследуемом веществе связано с большими вариациями величины накачки при регистрации максимумов и минимумов