

за время накопления. На рис. 2, б представлено частотно-временное распределение того же ЛЧМ-сигнала при снижении скорости смещения зарядов в ПЭС-матрице в ~ 10 раз по сравнению с первым экспериментом. Видно, что в данном случае каждый временной отсчет распределения содержит значительную часть спектра исследуемого сигнала.

Таким образом, нами была теоретически и экспериментально исследована схема акустооптоэлектронного устройства, позволяющего формировать в реальном масштабе времени модифицированное распределение Вигнера. Получено выражение для выходного сигнала системы при произвольной функции окна. Эксперименты подтвердили возможность применения данного устройства для анализа реальных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Escudie B., Grea J. Joint representation (JR) in signal theory (ST) and Hilbertian analysis: a powerful tool for signal analysis // Proc. IEEE Int. Conf. San Diego, 1984.
2. Bouchache B., Rodriguez F. Recognition of time-varying signal in the time-frequency domain by means of the Wigner distribution // Ibit.
3. Claasen T. A. C. M., Meeklenbrüker W. F. G. The Wigner distribution — a tool for time-frequency signal analysis // Philips J. of Research.— 1980.— V. 35, N 3.— P. 217—250.
4. Bartelt H. O., Brenner K.-H., Lohmann A. W. The Wigner distribution function and its optical production // Opt. Comm.— 1980.— V. 32, N 1.— P. 32—38.
5. Athale R. A., Lee J. N., Robinson E. L., Szu H. H. Acousto-optic processors for real-time generation of time-frequency representations // Opt. Lett.— 1983.— V. 8, N 3.— P. 166—168.
6. Водоватов И. А., Высоцкий М. Г., Петрунькин В. Ю. и др. Система регистрации и обработки оптических сигналов на основе ПЭС-структур и микроЭВМ «Электроника 60М» // Автометрия.— 1985.— № 6.

Поступила в редакцию 30 июля 1986 г.

УДК 534.08 : 621.373.826

Х. Т. АБЕЙНАЯКЕ, В. А. КОМОЦКИЙ

(Москва)

ИЗМЕРЕНИЕ ОТРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН (ПАВ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ОПОРНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ (ОДР)

Метод оптического зондирования ПАВ с опорной дифракционной решеткой ранее был использован для измерения амплитуды [1, 2] и фазовых распределений ПАВ [3, 4]. В настоящей работе мы рассматриваем возможность его применения для измерения модуля и фазы коэффициента отражения ПАВ от границ либо от отражающих структур. На рис. 1 изображена оптическая схема зондирования. Световой пучок от лазера пересекает ОДР, отражается от звукопровода ПАВ и вторично пересекает ОДР. Период ОДР (Λ_p) равен длине волны Λ . Из образовавшейся дифракционной картины мы выделяем нулевой порядок и направляем его на фотодетектор. Интенсивность дифрагированного светового пучка промодулирована с частотой ПАВ (Ω), ее переменная, составляющая I_0^Ω , имеет амплитуду, пропорциональную амплитуде бегущей ПАВ, а фаза связана с фазой бегущей волны. Величину I_0^Ω мы будем называть полезным сигналом. Переменная составляющая тока фотодетектора i_0^Ω , пропорциональная I_0^Ω , используется для амплитудных и фазовых измерений.

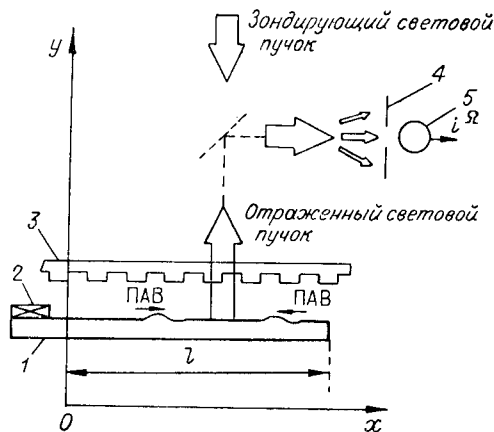


Рис. 1. Схема расположения ОДР и звукопровода относительно системы координат в случае измерения отражений ПАВ: 1 — звукопровод ПАВ; 2 — возбуждатель ПАВ; 3 — опорная дифракционная решетка; 4 — диффрагма; 5 — фотодетектор

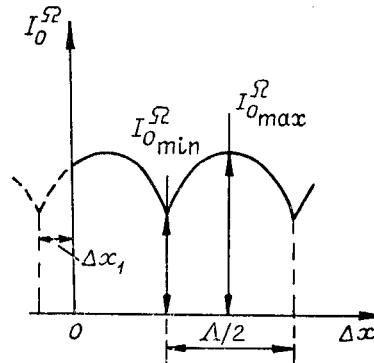


Рис. 2. Характер изменения амплитуды полученного сигнала при перемещении звукопровода относительно ОДР.

Смещение минимума относительно выбранной системы отсчета, связанной со скачком фазы ОДР, зависит от фазы отражения ПАВ

При наличии падающей и отраженной волн на звукопроводе полезный сигнал образуется как суперпозиция двух компонент колебаний с частотой Ω от падающей и отраженной волн. Фазы этих компонент линейно изменяются в противоположные стороны при смещении звукопровода в направлении распространения ПАВ. В результате наблюдается периодическая зависимость амплитуды полезного сигнала от смещения звукопровода, регистрируя которую можно определить модуль и фазу коэффициента отражения ПАВ.

Для более детального пояснения принципа и методики измерений рассмотрим некоторые соотношения в простейшем случае, когда падающая и отраженная акустические волны коллинеарны. Действие ПАВ на фронт оптической волны можно представить в виде эквивалентной фазовой решетки с пропусканием $T(x) = \exp[iU(x)] \approx 1 + iU(x)$, где $U(x)$ — функция фазовой модуляции, обусловленной действием падающей и отраженной волн:

$$U(x) = U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}}, \quad (1)$$

$$U_{\text{пад}} = U' \sin(\Omega t - kx - \varphi_0),$$

$$U_{\text{отр}} = U'' \sin(\Omega t + kx - 2kl + \varphi_{\text{отр}} - \varphi_0), \quad (2)$$

U' и U'' — амплитуда фазовой пространственной модуляции за счет падающей и отраженной волн; $k = 2\pi/\Lambda$; Λ — период ПАВ; l — расстояние от выбранного начала координат до края подложки либо до другой исследуемой неоднородности, вызывающей отражение; $\varphi_{\text{отр}}$ — дополнительный фазовый сдвиг при отражении; φ_0 — начальная фаза ПАВ в точке $x = 0$.

В качестве ОДР используется фазовая решетка в виде меандра с оптимальной глубиной фазовой модуляции $\Phi_M = \pi/8$ [2] и с функцией пропускания типа

$$T_2(x) = e^{i\Phi(x)}, \quad \text{где } \Phi(x) = \begin{cases} \Phi_M & \text{при } 0 < x < \Lambda/2; \\ -\Phi_M & \text{при } -\Lambda/2 < x < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Анализ пространственного спектра оптической волны после взаимодействия с системой ПАВ — ОДР по схеме рис. 1 с учетом исходных выражений (1) — (3) по методике [3] дает следующее выражение:

$$A_0 = \cos \Phi_M - \frac{2}{\pi} U'' \sin \Phi_M \cos \gamma_2 + \frac{2}{\pi} U' \sin \Phi_M \cos \gamma_1, \quad (4)$$

где $\gamma_1 = (\Omega t - \varphi_0)$, $\gamma_2 = (\Omega t - 2kl + \varphi_{\text{отр}} - \varphi_0)$.

Вычислив интенсивность $I_0 = A_0 A_0^*$ и опуская при этом перекрестные члены второго порядка малости $U'U''$, $(U')^2$, $(U'')^2$, получим выражение для интенсивности нулевого порядка

$$I_0 = \cos^2 \Phi_M + \frac{2}{\pi} \sin 2\Phi_M (U' \cos \gamma_1 - U'' \cos \gamma_2). \quad (5)$$

Второй член выражения (5) — это переменная составляющая с частотой Ω , т. е. полезный сигнал, который можно представить в виде

$$I_0^\Omega = A \cos(\Omega t - \varphi_0 - \varphi_R), \quad (6)$$

где

$$A = \frac{2}{\pi} \sin 2\Phi_M \sqrt{(U')^2 + (U'')^2 - 2U'U'' \cos(2kl - \varphi_{отр})}, \quad (7)$$

$$\varphi_R = \text{arctg} \left\{ \frac{U'' \sin(2kl - \varphi_{отр})}{U' - U'' \cos(2kl - \varphi_{отр})} \right\}. \quad (8)$$

Соотношения (6) — (8) определяют амплитуду и фазу полезного сигнала. Из формулы (7) видно, что амплитуда полезного сигнала зависит от амплитуд падающей и отраженной волн, от фазы коэффициента отражения $\varphi_{отр}$ и от взаимного расположения решетки и звукопровода. Если сместить звукопровод вдоль направления x , то получим периодические изменения амплитуды I_0^Ω в зависимости от l с периодом $\Lambda/2$ (рис. 2), которые аналогичны изменениям амплитуды в картине стоячих волн в измерительной линии СВЧ.

Модуль коэффициента отражения R можно определить из эксперимента, измерив максимальное (i_{\max}^Ω) и минимальное (i_{\min}^Ω) значения сигнала при перемещении звукопровода относительно неподвижной решетки и вычислив $\alpha = \frac{i_{\max}^\Omega}{i_{\min}^\Omega} = \frac{I_{\max}^\Omega}{I_{\min}^\Omega}$, а затем и величину $R = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}$. При

этом для измерения модуля коэффициента отражения первоначальное расположение ОДР и звукопровода относительно начала координат не имеет значения, а важно лишь отношение α .

Используя эту же схему, можно измерить фазу коэффициента отражения. Для этого расположим начало системы координат на расстоянии, равном целому числу полуволн от края подложки, и совместим скачок фазы ОДР с началом этой системы координат. При этом вследствие $\Lambda_p = \Lambda$ другой скачок фазы совпадает с краем подложки. Это положение будет исходным. Если бы $\varphi_{отр} = 0$, то в исходном положении сигнал на выходе системы зондирования был бы минимальным, так как $\cos 2kl = 1$. Если же $\varphi_{отр} \neq 0$, то минимальное значение сигнала будет достигаться при некотором смещении звукопровода Δx_1 относительно ОДР по сравнению с исходным положением. При этом из условия минимума $2k(m\Lambda/2 + \Delta x_1) - \varphi_{отр} = 2\pi n$ получим

$$\varphi_{отр} = \frac{4\pi}{\Lambda} \Delta x_1. \quad (9)$$

Два основных фактора, определяющих погрешность измерения данным методом, — это ошибка установки исходного положения решетки относительно подложки δx_n и ошибка определения положения минимума стоячей волны. Чтобы достичь, например, точности измерения фазы $\pm 5^\circ$ при длине волны 200 мкм, было бы необходимо выполнить операции совмещения, сдвига и определения положения минимума с точностью $\pm 1,4$ мкм. Учитывая, что предельная точность совмещения с использованием оптических методов 1—2 мкм, применение данного метода для измерения фазы коэффициента отражения при длинах волн короче 200 мкм практически нереально, однако можно использовать его для исследований в области длин волн $\Lambda = 500$ мкм и более. Обеспечение условия $\Lambda_p = \Lambda$ с высокой точностью не вызывает затруднений и достигается путем применения специально разработанной методики. Подложка

и решетка связываются жестко между собой; в таком состоянии осуществляется сканирование подложки с решеткой относительно светового зондирования пучка в направлении распространения ПАВ и при этом производится измерение приращения фазы $\delta\phi_i$ на выходе оптического канала по отношению к опорному сигналу, взятому с возбuditеля. Если $\delta\phi_i = 0$, то условие $\Lambda = \Lambda_p$ выполняется с точностью, определяемой длиной сканирования и точностью измерения фазы. Если $\delta\phi_i \neq 0$, то необходимо несколько подстроить частоту ПАВ. Более детально методика будет изложена отдельно.

Измерение модуля коэффициента отражения осуществляется значительно проще и не требует установки исходного положения опорной решетки. Поэтому такие измерения могут быть проведены и при значительно меньших длинах волн, чем измерения фазы.

Для практического испытания этой методики был проведен эксперимент с использованием ПАВ на подложке кварца *ux*-среза. ПАВ с $\Lambda = 100$ мкм возбуждалась с помощью встречно-штыревого преобразователя, распространялась в направлении *x* и отражалась от грани кристалла. Измерялись зависимости амплитуды сигнала от смещения звукопровода Δx . По результатам измерений амплитуды получено значение модуля коэффициента отражения 0,38 (для отражения от края подложки со шлифованной гранью) и 0,43 — для подложки с полированной гранью.

В результате проведенной работы обоснована возможность создания новой методики для определения параметров отражения ПАВ с использованием метода оптического зондирования с опорной дифракционной решеткой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Оптическое зондирование поверхностных акустических волн в присутствии стационарной периодической решетки // *Опт. и спектр.*— 1980.— Т. 49, № 2.
2. 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.— V. 52, N 1.— P. 129—136.
3. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А., Котюков М. В. Анализ взаимодействия световой волны с системой пространственно разнесенных периодических структур при оптическом зондировании ПАВ // *Опт. и спектр.*— 1984.— Т. 56, № 6.
4. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Измерение фазовых распределений поверхностных акустических волн методом оптического зондирования с опорной дифракционной решеткой // *Автометрия.*— 1982.— № 5.

Поступила в редакцию 17 ноября 1986 г.

УДК 621.315.592

Н. А. КУДРЯШОВ, С. С. КУЧЕРЕНКО, Е. А. МАЗУР

(Москва)

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Для экспериментального и теоретического исследования высоковольтных состояний в полупроводниках (п/п) в настоящее время широко применяется метод динамических решеток неравновесных носителей заряда (ННЗ). Пространственно-периодические распределения ННЗ при этом индуцируются в п/п стоячей электромагнитной волной со временем воздействия порядка нескольких пико- или наносекунд. Распад такой решетки позволяет определить зависимости времен релаксации электронов и дырок от их концентрации, значения коэффициентов диф-