

ЗАРЯДОВЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛЬНОГО КОНТРАСТА ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В РЭМ

Н. Н. Дремова, А. И. Ерко, Д. В. Рощупкин

УДК 534.6

Исследовано формирование интерференционного изображения электростатического поля поверхностной акустической волны и «паразитного» электромагнитного поля, возникающего над поверхностью кристалла, в РЭМ. Показано, что электростатическое изображение ПАВ сохраняется в течение длительного времени. Приведены оценки времени хранения интерференционного изображения ПАВ в РЭМ.

Применение методов растровой электронной микроскопии (РЭМ) для функциональной диагностики приборов микроэлектроники позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на разработку новых схем интегральной микроэлектроники. Эти методы оказываются также чрезвычайно полезными при исследовании физических закономерностей распространения электрических, оптических и акустических сигналов в приповерхностных областях. При этом пространственное разрешение достигает десятых долей микрона, а чувствительность к электрическим сигналам до $10 \div 100$ мВ [1]. Однако в ряде случаев зондирующий электронный пучок может оказывать заметное влияние на наблюдаемую физическую картину, несмотря на слабую интенсивность и низкую энергию. Для отдельных применений методики РЭМ это может оказаться весьма полезным [2].

В данной работе проведены исследования формирования метастабильного потенциального контраста при взаимодействии поля поверхностной акустической волны с электронным зондом в режиме автостробоскопии в РЭМ.

В качестве методики исследований был применен режим автостробоскопии, описанный в ряде работ [3, 4].

Экспериментальные результаты

Звукопроводом служила линия задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ), изготовленная на YZ -срезе кристалла LiNbO_3 . Длина волны ПАВ составляет 160 мкм.

Визуализация ПАВ была проведена в РЭМ BS-300 при ускоряющем напряжении $E_0 = 1 \div 3$ кВ и токе зонда $I_0 = 10^{-11}$ А. Использование более высоких ускоряющих напряжений недопустимо, так как в этом случае диэлектрические подложки сильно заряжаются, что приводит к искажению изображения, связанному с отклонением электронного зонда и изменением эмиссии вторичных электронов с поверхности [5].

На рис. 1, а приведена микрофотография бегущей ПАВ, полученная методом автостробоскопии при ускоряющем напряжении $E_0 = 1$ кВ. В ходе эксперимента было установлено, что после выключения высокочастотного сигнала, преобразуемого в упругие волны Рэлея, на поверхности LiNbO_3 остается изображение ПАВ. На рис. 1, б приведено изображение поверхности кристалла, полученное через 10 мин после выключения входного сигнала. Более того,

для фиксации изображения совсем не обязательно облучение прямым пучком электронов. На рис. 1, *в* приведена микрофотография поверхности кристалла через 10 мин после выключения высокочастотного сигнала, однако в данном случае источником вторичных электронов служил подвергнутый облучению

участок образца кристалла, расположенный на расстоянии ~ 3 мм от места наблюдения.

Таким образом осуществляется электростатический режим записи информации о бегущей по поверхности кристалла волне, причем высокочастотный сигнал «детектируется» при взаимодействии переменного электростатического поля акустической волны и нормальной к поверхности компоненты электромагнитного излучения встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Имея одну и ту же частоту, эти два волновых процесса обладают разными длинами волн (длина акустической волны 160 мкм, электромагнитной волны 137 м). Причем электромагнитное излучение и акустическая волна когерентны друг с другом, так как излучаются одним и тем же источником. В пространстве над поверхностью происходит интерференционное взаимодействие поля электромагнитной волны и электростатического поля ПАВ (рис. 2). Разность фаз электромагнитной и электростатической волн определяется как

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_a^* - 1) L, \quad (1)$$

где n_a^* — эффективный коэффициент преломления электростатической волны, распространяющейся вдоль поверхности кристалла; L — расстояние от ВШП. Если принять, что скорость электромагнитной волны в вакууме равна c — скорости света, а скорость звуковой волны в кристалле LiNbO_3 в данной ориентации среза ~ 3500 м/с, получим величину

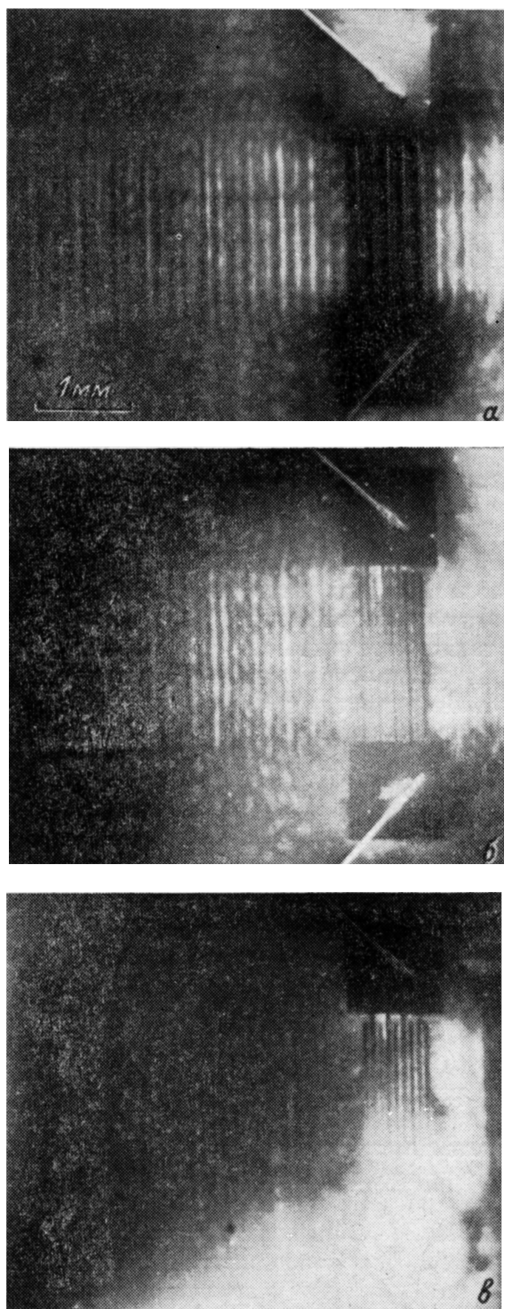


Рис. 1. РЭМ-микрофотографии, полученные при ускоряющем напряжении $E_0 = 1$ кВ и токе зонда $I_0 = 10^{-11}$ А.

эффективного коэффициента преломления электростатической волны $n_a^* \simeq 8.6 \cdot 10^6$, т. е. $n_a^* \gg 1$. Это означает, что над поверхностью кристалла возникает стационарное интерференционное поле с длиной волны $\lambda_{\text{и}}$, с точностью до $\sim 10^{-7} \lambda_{\text{ПАВ}}$ совпадающей по величине с $\lambda_{\text{ПАВ}}$, что и наблюдается в эксперименте.

Однако, согласно общей квантовой теории когерентности, интерференционная картина может наблюдаться только в веществе — процесс взаимодействия описывается матричным элементом перехода атомов в новые состояния и фотон-

фотонное взаимодействие отсутствует. В данном случае регистрирующей средой является облако вторичных электронов, покинувших поверхность под действием первичного пучка электронов. По-видимому, также происходит интерференционная поляризация поверхности кристалла с периодом, очень близким к периоду акустической волны (так как $\lambda_n \approx \lambda_{ПAB}$). Выборочная зарядка областей «пучностей» интерференционной волны из электронного облака обуславливает механизм «памяти» интерференционной структуры. В качестве «проявителя» интерференционной картины можно использовать как электронное облако, так и свет, рентгеновское излучение или тепловое излучение.

Зарядовый характер регистрируемого изображения иллюстрирует рис. 3, где приведена дифракционная картина, возникающая при отражении лазерного излучения с длиной волны 0.63 мкм от поверхности кристалла с зарегистрированной интерференционной картиной. Локальная зарядка проявляется в периодическом изгибе поверхности кристалла, образовании оптической дифракционной решетки.

Обсуждение экспериментальных результатов

Изображение ПАВ может храниться на поверхности кристалла $LiNbO_3$ довольно продолжительное время. Проведем оценку времени хранения изображения в РЭМ исходя из зарядового механизма фиксации изображения. Предположим, что профиль распределения потенциала электростатического изображения соответствует металлизации встречно-штыревого преобразователя, кото-

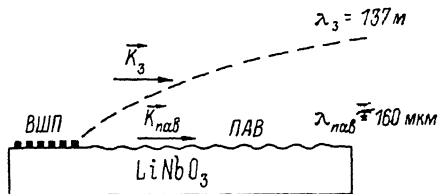


Рис. 2. Схема интерференционного взаимодействия поля электромагнитной волны и электростатического поля ПАВ.

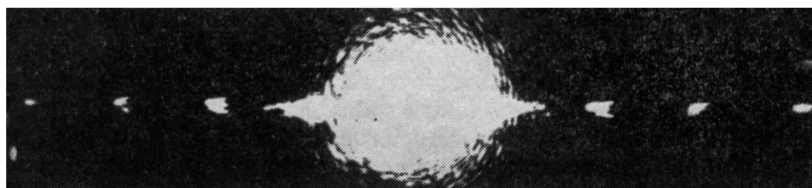


Рис. 3. Фотография дифракции лазерного излучения с длиной волны 0.63 мкм от поверхности кристалла с зарегистрированной интерференционной картиной.

рый используется для возбуждения ПАВ. В данном случае один период электростатического изображения можно рассмотреть как параллельную RC -цепочку. Тогда время t , за которое потенциал электростатического изображения уменьшается со значения $U(0)$ до величины $U(t)$, можно определить из следующей формулы:

$$U(t) = U(0) e^{-t/RC}, \quad (2)$$

где R — сопротивление одного периода электростатического изображения ПАВ, C — емкость данного участка (емкость двух конечных заряженных пластин). Емкость двух конечных заряженных пластин определяется из следующей формулы [6]:

$$C = (w_n/2) (\sqrt{\epsilon_n \epsilon_{\perp}} + \epsilon_n) \epsilon_0 [K(q_n)/K(\sqrt{1 - q_n^2})]. \quad (3)$$

Здесь w_n — ширина апертуры акустической волны; ϵ_n — диэлектрическая проницаемость в направлении распространения ПАВ; ϵ_{\perp} — диэлектрическая проницаемость в направлении, перпендикулярном распространению ПАВ; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; $K(q_n)$, $K(\sqrt{1 - q_n^2})$ — полные эллиптические интегралы в форме Якоби; $q_n = \sin(\pi S_n/2L_n)$, где S_n — ширина металлического электрода, L_n — половина длины акустической волны.

Сопротивление R определим из следующей формулы:

$$R = L_n / \sigma w_n S_n, \quad (4)$$

где σ — удельная электропроводность. Подставляя значения C из (3) и R из (4) в формулу (2), найдем время t , за которое потенциал $U(0)$ уменьшится до значения $U(t)$

$$t = \frac{(\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_{\perp}} + \varepsilon_n) \varepsilon_0 L_n [K(q_n) / K(\sqrt{1 - q_n^2})]}{2\sigma S_n} \ln \frac{U(0)}{U(t)}. \quad (5)$$

Потенциал акустической волны прямо пропорционален напряжению входного сигнала, подаваемого на ВШП. Поэтому в формуле (5) значения $U(0)$ и $U(t)$ можно заменить значениями напряжения входного сигнала. Экспериментально установлено, что минимальное напряжение входного сигнала, при котором можно визуализировать ПАВ, составляет 0.56 В. Подставим в формулу (5) вместо $U(t)$ значение 0.56 В. Визуализацию ПАВ осуществляли при величине напряжения входного сигнала 13 В. При ширине металлического электрода $S_n = L_n/2$ отношение $[K(q_n) / K(\sqrt{1 - q_n^2})] = 1$. В этом случае формула (5) упрощается

$$t = \frac{(\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_{\perp}} + \varepsilon_n) \varepsilon_0}{\sigma} \ln \frac{U(0)}{U(t)}. \quad (6)$$

Подставим в формулу (6) значения электрофизических параметров LiNbO_3 : $\varepsilon_1 = 38.5$, $\varepsilon_{\perp} = 99.5$, $\varepsilon_n = 1$, $\sigma = 4 \cdot 10^{-14}$ (Ом·м) $^{-1}$. Получаем время хранения электростатического изображения $t \sim 12$ ч. Данное время хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Из формулы (5) видно, что время хранения электростатического изображения ПАВ определяется диэлектрической проницаемостью пьезоэлектрической подложки, удельной электропроводностью, шириной металлического электрода ВШП. Максимальная амплитуда входного сигнала $U(0)$ определяется длиной волны ПАВ и не может превышать значение пробойного напряжения для данной длины волны.

Выводы

В ходе проведения данной работы установлено, что в процессе визуализации бегущих ПАВ происходит формирование интерференционного изображения электростатического поля акустической волны и электромагнитного поля, возникающего над поверхностью кристалла. Период интерференционного поля из-за большого различия эффективных коэффициентов преломления электростатической и электромагнитной волны практически совпадает с периодом акустической волны. Установлено, что электростатическое изображение сохраняется в течение длительного времени, проведены оценки времени хранения информации исходя из электрофизических параметров кристалла.

Резонансный характер возбуждения акустической волны позволяет сдвигать ее фазу по отношению к электромагнитной волне при перестройке в пределах резонансной кривой. Изменение контраста изображения (вплоть до инверсии контраста полос) при перестройке частоты в пределах резонанса однозначно доказывает интерференционный характер возникающего стационарного электрического поля над поверхностью образца.

Литература

- [1] Гоулдетейн Дж., Якович Х. Практическая растровая электронная микроскопия. М.: Мир, 1978. 651 с.
- [2] Bert A. G., Epsztajn B., Kantorowicz G. J. Appl. Phys. Lett., 1972, v. 21, N 1, p. 50—53.
- [3] Wittels N. D., Tanski W. J. SEM, 1979, v. 1, N 1, p. 319—324.
- [4] Валатка Р., Дюков В., Ионелюнас С. и др. Литовский физ. сб., 1981, т. 21, № 1, с. 119—121.
- [5] Дремова Н. Н., Ерко А. И., Рошупкин Д. В. Поверхность, 1987, № 7, с. 125—130.
- [6] Винс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М.: Энергия, 1970. 376 с.

Институт проблем технологии
микроэлектроники и особых материалов
АН СССР,

Черноголовка Московской обл.

Поступило в Редакцию
10 июля 1987 г.