

ЭЛЕКТРОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВОЙ СКОРОСТЬЮ
ПАВ В СТРУКТУРЕ ОКИСЬ ЦИНКА НА КРЕМНИИМ.С. В е р ш и н и н, В.А. О с и п е н к о,
А.И. С у р ы г и н В.С. У с о в

Пьезополупроводниковые слоистые структуры металл – окись цинка – окись кремния – кремний (МЦОК–структуры) представляют значительный интерес для акустоэлектроники. В связи с тенденцией расширения функциональных возможностей радиокомпонентов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) необходимо указать на зависимость фазовой скорости ПАВ в МЦОК–структуре от приложенного к ней постоянного электрического поля. Этот эффект может быть использован как в управляемых устройствах на ПАВ, так и для исследований электрофизических свойств МЦОК–структур. Впервые экспериментальная зависимость скорости ПАВ от приложенного электрического поля была получена в [1, 2], где исследовался единственный образец. До сих пор этим исчерпываются опубликованные экспериментальные результаты. Их явно недостаточно для разрешения некоторых важных вопросов, в частности, о пределах изменения фазовой скорости ПАВ при различных удельных сопротивлениях кремния в МЦОК–структуре и об адекватности реальным процессам физической модели [3] изменения скорости ПАВ под действием электрического поля.

Цель работы – экспериментальное исследование зависимости фазовой скорости ПАВ от приложенного электрического поля в широком диапазоне изменения удельного сопротивления кремния и связанных с этой зависимостью электрофизических свойств МЦОК–структур, а также уточнение физической модели [3].

Исследовались образцы двух типов. Одни были изготовлены на подложках из высокоомного ($\rho = 300 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) кремния n -типа, причем толщины слоев двуокиси кремния и окиси цинка составляли 0.4 и 6 мкм соответственно. Другие образцы были выполнены на низкоомном ($\rho = 4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) n -кремнии с толщинами окислов кремния и цинка 0.1 и 0.7 мкм. Указанные значения ρ выбраны с тем, чтобы исследовать изменения фазовой скорости ПАВ от величины электрического поля в широком диапазоне удельных сопротивлений кремния, причем принималось во внимание, что в [1, 2] исследовался образец с $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Пленки окиси цинка наносились методом катодного распыления в триодной системе на постоянном токе. На поверхности образцов формировались встречно-штыревые преобразователи (ВШП), причем между входным и выходным ВШП по апертуре акустического канала наносился сплошной металлический электрод. Такой же электрод наносился на нижнюю поверхность кремниевой подложки. К этим электродам в эксперименте прикладывалось управляющее напряжение U_y . Изготовленные

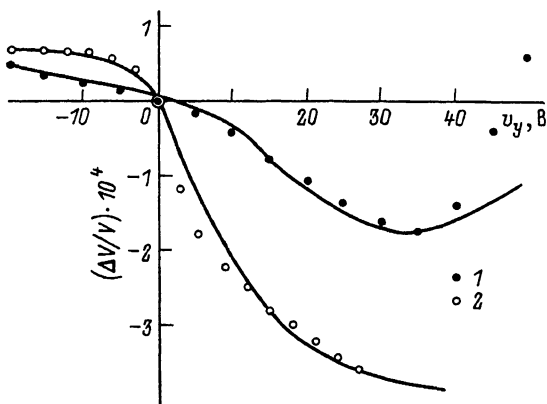


Рис. 1. Экспериментальные точки и расчетные кривые зависимостей $\Delta V/V$ (U_y) для типичных образцов МЦОК-структур с удельным сопротивлением кремния 4.5 (1) и 300 (2) Ом·см.

таким образом линии задержки (частоты акустического синхронизма образцов первой и второй серий составляли 132 и 185 МГц соответственно) включались в цепь обратной связи генератора. Изменялось изменение частоты его колебаний в зависимости от величины электрического смещения, поданного на управляющие электроды. Относительное изменение частоты генератора $\Delta f/f_0$ затем пересчитывалось в относительное изменение фазовой скорости ПАВ $\Delta V/V$ по формуле

$$\frac{\Delta V}{V} = \left[1 - \frac{dV}{d(\omega h)} \cdot \frac{\omega h}{V} \right] \cdot \frac{L}{l} \cdot \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (1)$$

где ω - круговая частота, h - толщина пленки, L - расстояние между ВШП, l - протяженность управляющего электрода вдоль пути распространения ПАВ. Отношение $\frac{\omega h}{V} = kh = \frac{2\pi h}{\lambda}$, где k, λ - волновое число и длина ПАВ соответственно, рассчитывалось по известным геометрическим параметрам МЦОК-структуры и ВШП, а производная $dV/d(\omega h)$ определялась по расчетным дисперсионным характеристикам. Первое слагаемое в (1) описывает связь между изменениями фазовой скорости ПАВ и частоты колебаний генератора без учета дисперсии ПАВ, второе слагаемое учитывает эту дисперсию.

Экспериментальные зависимости $\frac{\Delta V}{V}(U_y)$ представлены на рис. 1. Расчетные зависимости, полученные по [3], лишь качественно соответствуют эксперименту. Расхождение экспериментальных и расчетных зависимостей вызвано тем, что в [3] не учитывался встроенный заряд в структуре. О наличии встроенного заряда можно

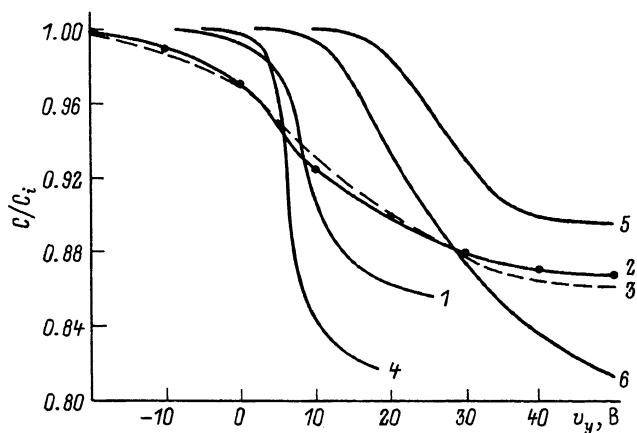


Рис. 2. Вольт-фарадные зависимости: расчетная без учета встроенного заряда (1); экспериментальная той же МЦОК-структуры ($\rho = 4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) (2); расчетная той же структуры с учетом встроенного заряда (3); экспериментальная МДП-структуры $\text{Si}-\text{SiO}_2$ до напыления ZnO (4); после напыления (5) и после удаления ZnO (6).

судить по вольт-фарадным (CV) характеристикам МЦОК-структур, приведенным на рис. 2. Ясно видны отличия расчетной (традиционным методом расчета МДП-емкости [4]) и экспериментальной зависимостей (кривые 1 и 2 соответственно). Сдвиг экспериментальной CV -характеристики по оси управляющего напряжения относительно расчетной вызван фиксированным зарядом, а отличие в крутизне — зарядом, зависящим от приложенного управляющего напряжения [5]. Отметим, что существенный заряд, являющийся следствием нанесения пьезоэлектрической пленки, оказывается не только в пленке окиси цинка, но и в слое двуокиси кремния. Это хорошо иллюстрируют экспериментальные CV -характеристики (зависимости 4–6 на рис. 2). Зависимость 4 получена на образце $\text{Si}-\text{SiO}_2$ до напыления пленки окиси цинка, 5 — после напыления ZnO и, наконец, 6 — вновь на образце $\text{Si}-\text{SiO}_2$, но после удаления пьезопленки. Аналогичный эффект для CV -характеристик в МЦОК-структуре, но при другом способе напыления пленок окиси цинка, описан в [6]. Учет зарядов, возникающих в структуре в результате нанесения пьезопленки, позволяет привести в соответствие экспериментальные и расчетные зависимости фазовой скорости ПАВ от управляющего напряжения U_y на основании скорректированной модели [3]. В [3] относительное изменение фазовой скорости ПАВ определялось по характеристикам распределения подвижных носителей в приповерхностной области полупроводника, т.е. по параметрам обогащенного, обедненного и инверсионного слоев и концентрациям

электронов и дырок в них. Эти параметры рассчитывались по потенциалу φ_s на поверхности полупроводника известными методами [4] без учета зарядов в слоях. Анализ всех имеющихся данных позволяет утверждать, что причина упомянутых выше расхождений расчетов по [3] с экспериментом состоит именно в пренебрежении зависящим от U_y зарядом в окислах МЦОК-структуры при определении φ_s . Учет этого заряда дает связь между U_y и φ_s , отличающуюся от [3] дополнительным членом, зависящим от некоторой эффективной концентрации зарядов в окислах и на границах раздела $N_{эфф}(U_y)$:

$$\frac{U_y}{\varphi_s} = \frac{2\epsilon_s}{\epsilon_{33}} \cdot \frac{h}{L_D} \cdot F(u_s, \nu) + u_s \cdot \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{33}} \cdot \frac{h^2}{L_D^2} \cdot \frac{N_{эфф}(U_y)}{N_D}, \quad (2)$$

где $\epsilon_s, \epsilon_{33}$ — относительная диэлектрическая проницаемость и компонента тензора относительной диэлектрической проницаемости подложки и пьезопленки, N_D — концентрация доноров в кремнии,

$$L_D = \sqrt{\frac{2\varphi_T \epsilon_s \epsilon_0}{q N_D}}, \quad F(u_s, \nu) = \sqrt{(e^{u_s} - u_s - 1) + \nu(e^{-u_s} + u_s - 1)},$$

$$u_s = \frac{\varphi_s}{\varphi_T} = \frac{q\varphi_s}{k_B T}, \quad \nu = \frac{n_i^2}{N_D^2}, \quad \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{m}, \quad q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

k_B — постоянная Больцмана, T — температура, $N_{эфф}(U_y) = N_+(U_y) + 2N_G(U_y)/h$, $N_+(U_y)$ — концентрация встроенных объемных зарядов в пленке, $N_G(U_y)$ — поверхностная концентрация на границе раздела. Вопросы о распределении $N_+(U_y)$ по толщине слоев, о соотношении между N_+ и N_G , о виде реальных зависимостей $N_{эфф}$, N_+ , N_G от напряжения смещения U_y требуют особого изучения. Это тем более важно, что, как показывают полученные результаты, знание закона изменения $N_{эфф}$ от U_y необходимо для адекватного расчета акустоэлектронного взаимодействия в МЦОК-структурах при наличии поперечного электрического поля, а имеющихся в литературе сведений явно недостаточно. В этой работе не стояла задача тщательного изучения зависимости $N_{эфф}(U_y)$, поэтому мы ограничились лишь определением коэффициентов A, B линейной аппроксимации $N_{эфф}(U_y) = AU_y + B$ на основании сопоставления экспериментальных и расчетных (по [3]) данных. Результаты расчетов зависимостей изменения фазовой скорости ПАВ от приложенного напряжения по скорректированной с учетом (2) физической модели при описанной линейной аппроксимации $N_{эфф}(U_y)$ приведены на рис. 1. Наличие значительного встроенного заряда в слоях обусловлено, по-видимому, ловушками на границах раздела между слоями и между отдельными кристаллитами текстурированной пленки окиси цинка. Оценки плотности поверхностных состояний дают величину $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что вполне согласуется с типичными значениями для МЦОК-структуры [7].

Учет встроенных зарядов при расчете вольт-фарадных характеристик МЦОК-структур также позволяет получить результаты, хорошо совпадающие с экспериментом (например, кривая 3 на рис. 2).

Таким образом, на экспериментальные зависимости изменения фазовой скорости ПАВ от управляющего напряжения существенным образом влияют заряды в окисных слоях, значительно затрудняя адекватный расчет и получение повторяемых электрофизических свойств таких структур. Эти заряды необходимо учитывать в разработанной физической модели управления фазовой скоростью в МЦОК-структурах, а также в расчетах вольтфарадных характеристик таких структур.

Величина распределенного в окисных слоях заряда и вид ее зависимости от управляющего напряжения связаны с технологией напыления пленок окиси цинка. Изучение этой связи весьма важно для решения задачи обеспечения повторяемости параметров МЦОК-структур и создания устройств с заданными характеристиками. Такое изучение может производиться с помощью разработанной физической модели путем сопоставления экспериментальных и расчетных характеристик.

Разработанная физическая модель управления фазовой скоростью ПАВ в МЦОК-структуре может быть использована также для исследования электрофизических свойств тонких пьезопленок и приповерхностной области подложек.

Л и т е р а т у р а

- [1] U r a b e S., U k i S. - Electron Lett., 1980, v. 16, N 20, p. 777-778.
- [2] U r a b e S. - IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, 1982, SU-29, v. 5, p. 255-260.
- [3] С у р ы г и н А.И., У с о в В.С. - Изв. вузов СССР, Радиоэлектроника, 1984, т. 27, в. 11, с. 98-100.
- [4] З и С.М. Физика полупроводниковых приборов, т. 1, М.: Мир. 456 с.
- [5] З а й н и н г е р К.Х., Г е й м а н Ф.П. - Зарубежная электронная техн. 1971, № 1, p. 36-81.
- [6] B h a t t a c h a r y a A.B., P a n w a r B.S. C h a n d r a S. - Proc. Int. Symp. "Surface waves in Solids and Layered Structures", v. 3, Novosibirsk, Yuly 1-4, 1986, p. 159-165.
- [7] C o l d r e n L.A. - Appl. Phys. Lett., 1974, v. 25, N 9, p. 473-475.

Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина

Поступило в Редакцию
20 января 1988 г.