

- 3) приобретает навыки применения информационных технологий при решении инженерных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богумирский Б. Энциклопедия Windows 98. - СПб.: Питер, 1998. - 813с.
2. Дубина А.Г. Машиностроительные расчеты в среде Excel 97/2000. . - СПб.: BHV - Санкт - Петербург, 2000. - 416с.
3. Информатика: [Учебник для экономических специальностей] / Макарова Н.В. и др. - М.: Финансы и статистика, 2001. - 767с.
4. Microsoft Excel 2000:Справочник / Под ред. Колесникова Ю.В. - СПб.: Питер, 1999. - 475с.
5. Microsoft Word 2000:Справочник / Под ред. Карпова Б. - СПб.: Питер, 2000. - 384с.

УДК 621.37/39:534

В.В.Баркалин, Е.В.Полынцева

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОРНЫХ СЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Важнейшей тенденцией в развитии элементной базы сенсорных микросистем в настоящее время является разработка интегральных устройств, совмещающих на одном кристалле сенсорные и процессорные элементы, создаваемые в едином технологическом процессе. Переход к технологии нанозлектроники, требующий учета размерного эффекта в тонких металлических пленках процессорных элементов, в этом случае необходимо дополнить и исследованием размерного эффекта в металлизации сенсорных элементов.

Слой металлизации в сенсорных структурах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) используются для создания элементов, осуществляющих генерацию и прием ПАВ, а также элементов управления распространением ПАВ в пьезоактивных звукопроводах. Физической основой такого использования металлизированных участков звукопровода является эффект изменения характеристик распространения ПАВ при изменении распределения электрического потенциала и зарядов на поверхности звукопровода вследствие пьезоэлектрического эффекта. Мерой этого взаимодействия в случае ПАВ является коэффициент электромеханической связи, определяемый соотношением

$$k_{em}^2 = \frac{V_{free} - V_{met}}{V_{free}}$$

где V_{free} и V_{met} – фазовые скорости ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях соответственно.

Для возбуждения ПАВ в пьезоактивных звукопроводах обычно используются встречно-штыревые преобразователи (ВШП), образованные парами металлических электродов, наносимых на рабочую поверхность звукопровода, на которые подается переменное напряжение различной полярности. Период электродных структур определяет частоту генерируемой ПАВ, длина которой совпадает с периодом преобразователя или является его пространственной субгармоникой [1]. Для уменьшения эффектов переотражения ПАВ в электродных структурах используют аподизированные преобразователи с различными законами взвешивания длины области пересечения электродов каждой пары.

Обычно при проектировании металлизации используется приближение идеальной металлизации, при котором ее электрическое сопротивление принимается равным нулю. Однако при уменьшении толщины металлической пленки ее сопротивление обычно возрастает. Рост сопротивления, кроме нежелательных резистивных потерь в ВШП, приводит и к нарушению эквипотенциальности металлизированных участков, что вызывает искажение фазовых соотношений в волне и искажению волнового фронта ПАВ в направлении, перпендикулярном направлению распространения. Учет конечной электрической проводимости материала металлизации имеет важное значение и для снижения уровней шумов в ПАВ-устройствах, а также при анализе электро- и акусто-миграции материала металлизации [1,2].

Анализ этого влияния проведем на примере преобразователя простейшей структуры, состоящего из одной пары электродов конечной длины w (рис.1).

Поскольку сопротивление электродов предполагается конечным, токи в них и напряжения между ними будут зависеть от координаты X вдоль апертуры преобразователя. Вдоль оси Y токи в электродах будем считать однородными. Ток верхнего электрода обозначим $i(x)$, ток нижнего – через $i'(x)$, напряжение – через $v(x)$. Эквивалентная схема элемента длиной Δx преобразователя также представлена на рис.1. Через y на нем обозначена шунтирующая проводимость на единицу длины электродов, посредством которой описывается возбуждаемое акустическое поле, $i_s(x)$ – ток через нее. Если генерация ПАВ отсутствует, y соответствует емкости электродов на единицу длины. При наличии генерации в y учитывается проводимость излучения акустических волн.

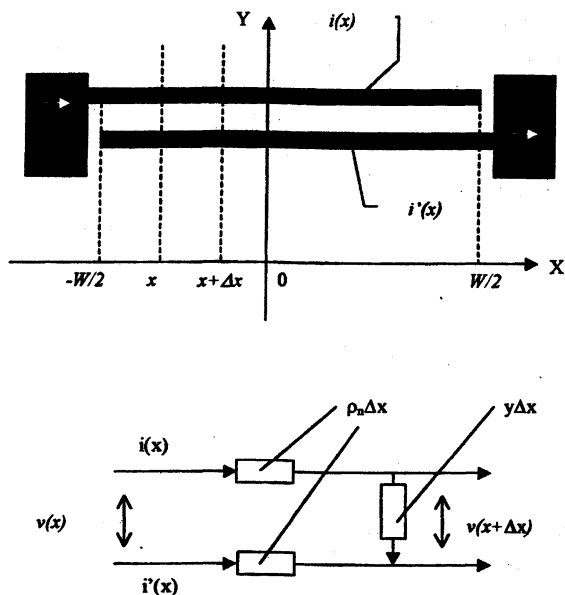


Рис. 1. Двухэлектродный ВШП и его эквивалентная схема

Для описания влияния сопротивления электродов на работу ВШП воспользуемся моделью металла Друде. При этом комплексное сопротивление единицы длины электродов представляется в виде

$$\rho_c = \frac{1}{\sigma \cdot S} \text{ [Ом/см]},$$

где σ – удельная проводимость, S – площадь поперечного сечения электродов.

Для электродов шириной в четверть длины ПАВ $S = h \frac{\lambda}{4}$, где h – толщина металлизации. Частотная зависимость проводимости дается выражением

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \cdot \frac{1 - i\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2},$$

где n – электронная плотность, τ – время релаксации электронов, e – заряд, m – масса электрона. Для электрического сопротивления единицы длины электродов металлизации получим тогда

$$\rho_c = r_0(1 + (\omega\tau)^2)e^{i\varphi}, \quad \text{где} \quad \varphi = \text{arctg}(\omega\tau); \quad r_0 = \frac{m}{e^2\tau nS}.$$

Удельная проводимость электродов ВШП может существенно отличаться от удельной проводимости массивного металла вследствие вклада поверхности металлизации и границы раздела с подложкой в рассеяние носителей заряда в тонкопленочном состоянии. Это отличие становится значительным, если толщина пленки становится сравнимой или меньше длины свободного пробега электронов в металле l_0 . Учесть зависимость сопротивления пленки от толщины можно посредством замены r_0 в соответствии с выражениями

$$r_0 \rightarrow r_1 = \begin{cases} r_0 \left(1 + \frac{3l_0}{8h}\right), & h > l_0 \\ \frac{4}{3} r_0 \frac{h}{l_0} \left(0,42 - \ln \frac{h}{l_0}\right), & h < l_0 \end{cases}$$

Распределение токов и напряжений вдоль электродов дается тогда выражениями

$$\begin{aligned} v(x) &= \frac{I\alpha}{2y} \left(e^{\alpha x} + e^{-\alpha x} \right) \left(e^{\alpha W/2} - e^{-\alpha W/2} \right); \\ i(x) &= \frac{I}{2} \left(1 - \left(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x} \right) \left(e^{\alpha W/2} - e^{-\alpha W/2} \right) \right); \\ i'(x) &= I - i(x); \quad \alpha^2 = 2\rho_e y. \end{aligned}$$

Выражая шунтирующую проводимость через добротность Q_a и акустическое сопротивление r_a на единицу длины пары электродов,

$$y = \frac{1}{r_a \sqrt{1+Q_a^2}} e^{i \arctg Q_a} = |y| e^{i\theta},$$

для коэффициента α получим

$$\alpha = \sqrt{\frac{2r_1}{r_a(1+Q_a^2)^{\frac{1}{2}}}} \exp\{i(\theta + \varphi)/2\}.$$

Если сопротивление электродов выразить через поверхностное сопротивление металлизации

$$\rho = \frac{r_1}{h} [\text{Om}/\square]$$

и использовать численные данные для акустического сопротивления, выраженные в единицах $\text{Om} \cdot \lambda$, где λ - длина ПАВ, получим

$$\alpha = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{r_a [\text{Om} \cdot \lambda]} \sqrt{1+Q_a^2}} \exp\left\{i \frac{\theta + \varphi}{2}\right\} \frac{\sqrt{\rho}}{\lambda}.$$

В качестве интегральной оценки качества металлизации в акустоэлектронных структурах удобно использовать резистивные потери в ВШП, которые определяются как

$$L_r = -10 \log_{10} \left(1 + \frac{P_r}{P_e}\right).$$

где P_r, P_a - соответственно мощность резистивных потерь и акустическая мощность ВШП:

$$P_r = 2r_1 \int_{-W/2}^{W/2} |i^2(x)| dx; \quad P_a = \operatorname{Re} y \int_{-W/2}^{W/2} |v^2(x)| dx.$$

Подставив сюда выражения для тока и напряжения, получим

$$L_r = -10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{\cos \Theta} \frac{ab(\operatorname{ch}(aW) - \cos(bW)) + b \operatorname{sh}(aW) - a \sin(bW)}{b \operatorname{sh}(aW) + a \sin(bW)} \right],$$

где $a = \operatorname{Re} \alpha$, $b = \operatorname{Im} \alpha$.

В соответствии с полученными аналитическими выражениями были рассчитаны резистивные потери в двухэлектродном ВШП в случае многослойной металлизации из Al, Cu и аморфного углерода а-С для электродов различной длины и толщины в звукопроводах из кварца ST-среза и структуры $\text{Si}|\text{SiO}_2|\text{ZnO}$ в зависимости от длины свободного пробега электронов в металлах в случае многослойной металлизации металл/а-С и удельного электрического сопротивления материала в случае однослойной а-С металлизации (длина свободного пробега электронов и дырок в последнем случае всегда порядка межатомного расстояния). Покрытие а-С предлагается использовать для пассивации металлизации и снижения температурных градиентов в металле. Толщина пассивирующего слоя выбиралась равной 100 нм. Обычно используемые параметры массивных металлов представлены в табл. 1 вместе с предельными значениями, известными в настоящее время для комнатной температуры и соответствующими сверхчистым монокристаллическим образцам Al и Cu. Минимальное электрическое сопротивление а-С в настоящее время составляет 0,1 Ом*см.

Полученные результаты расчетов представлены на рис.2-4. Следует отметить, что они свидетельствуют о необходимости всемерно уменьшать электрическое сопротивление металлизации при переходе к нанометровому диапазону толщин, поскольку резистивные потери в ВШП оказываются слишком высокими.

Таблица 1

Параметры массивных металлических особо чистых материалов

Металл	Удельное сопротивление, 10^{-6} Ом*см	Длина свободного пробега электронов	Предельная длина свободного пробега электронов при гелиевых температурах
Al	2,70	32,9 нм	17,5 мкм
Cu	1,72	31,5 нм	31 мкм

Использование медной металлизации оказывается во всех случаях более перспективным. Использование однослойной металлизации из аморфного углерода весьма проблематично из-за сравнительно высокого удельного сопротивления.

Основной механизм рассеяния электронов в тонких металлических пленках - фононный. Рассеяние на поверхности близко к зеркальному.

В этой связи необходимо развивать способы управления фононным рассеянием и использовать, в частности, гиперпроводящую металлизацию, особенно в слоистых ПАВ-структурах, где резистивные потери в ВШП растут при уменьшении толщины электродов существенно быстрее (рис.3). В частности, одним таким механизмом управления фононным рассеянием является перевод металлизации в сверхпроводящее состояние [3].

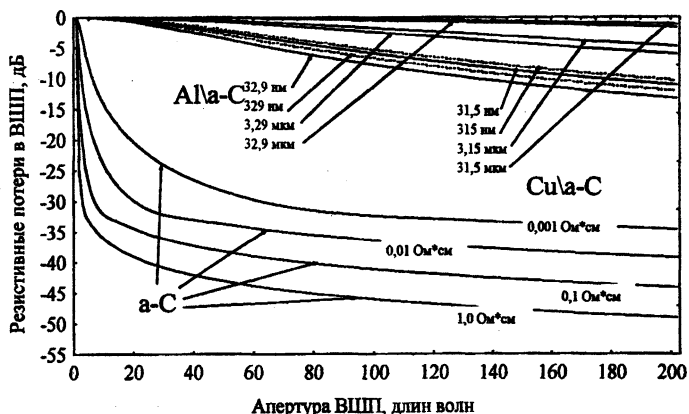


Рис.2. Металлизация 50 нм Al (Cu) + 100 нм а-С на ST-кварце

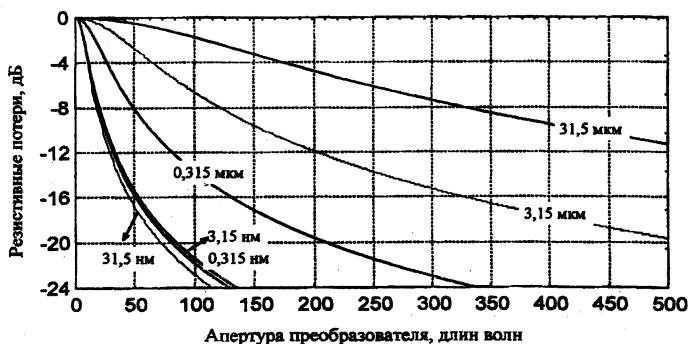


Рис.3. Cu металлизация толщиной 10 нм в $\text{Si}_3\text{SiO}_2\text{ZnO}_{<001>_{\{100\}}$
 $k_{\text{H}_{\text{ZnO}}}=2.9; k_{\text{H}_{\text{SiO}_2}}=0.0314$

Для оценки указанного эффекта воспользуемся двухжидкостной моделью сверхпроводимости Лондонов. При этом удельная проводимость материала электродов представляется в виде суммы вкладов нормальной и сверхпроводящей компонент электронной плотности:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_s,$$

$$\text{где } \sigma_n = \frac{n e^2 \tau}{m} \cdot \frac{1 - i\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad \sigma_s = -i \frac{e^2 n_s}{m\omega},$$

где n_n и n_s – нормальная и сверхпроводящая электронные. Зависимость n_n и n_s от температуры определяется соотношениями:

$$n_s = \begin{cases} 0, & T > T_c \\ \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right) \cdot n, & T \leq T_c \end{cases}; \quad n_n = \begin{cases} n, & T > T_c \\ \left(\frac{T}{T_c}\right)^4 \cdot n, & T \leq T_c \end{cases}$$

T_c – критическая температура сверхпроводящего перехода. Для электрического сопротивления единицы длины электродов получим тогда

$$\rho_c = r_1 A(T, \omega\tau) e^{i\varphi(T, \omega\tau)},$$

где

$$A = \begin{cases} (1 + (\omega\tau)^2), & T > T_c \\ \frac{\sqrt{\left(\frac{T_c}{T}\right)^8 + \frac{1}{(\omega\tau)^2} \left(1 - \left(\frac{T_c}{T}\right)^4 + (\omega\tau)^2\right)^2}}{1 + \frac{1}{(\omega\tau)^2} \left(1 - \left(\frac{T_c}{T}\right)^4\right)}, & T \leq T_c \end{cases};$$

$$i\varphi = \begin{cases} \omega\tau, & T > T_c \\ \frac{1}{\omega\tau} \frac{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4 + (\omega\tau)^2}{\left(\frac{T}{T_c}\right)^4}, & T \leq T_c. \end{cases}$$

При приближении к температуре перехода в сверхпроводящее состояние фаза α претерпевает изменение на $\varphi/2$. При малых $\omega\tau$ это изменение происходит практически мгновенно, а амплитудный множитель A быстро обращается в ноль. В соответствии с этим меняется и распределение напряжения вдоль электродов. При изменении напряжения соответствующим образом меняется и фаза возбуждаемой волны [4]. Если преобразователь разместить в резонансной полости ПАВ-резонатора, то указанный эффект приведет к изменению резонансной частоты последнего, что

можно использовать для прецизионного контроля температуры в окрестности сверхпроводящего перехода.

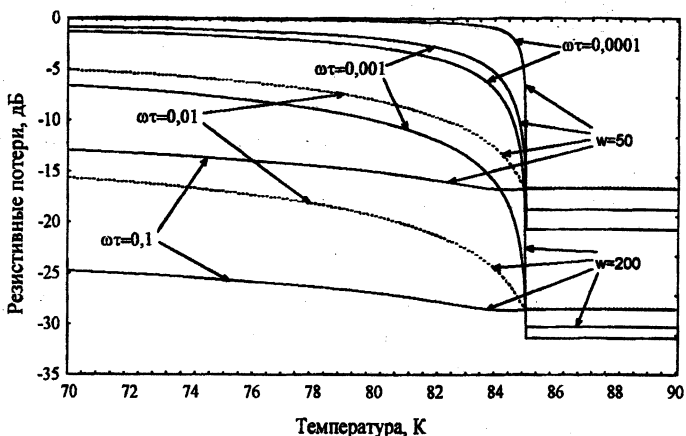


Рис.4. Резистивные потери в ВШП из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Полученные данные свидетельствуют, что переход в сверхпроводящее состояние обеспечивает получение практической эквипотенциальности электродов уже при температурах, всего на 0,5 К ниже T_c .

На рис.4 представлены резистивные потери для ВТСП-преобразователя на кварце ST-среза при различных временах релаксации и аперттурах ВШП.

Таким образом, возможность управления механизмами рассеяния электронов в материале металлизации ВШП, в частности, использование эффектов гипер- и сверхпроводимости, в принципе позволяет «интеллектуализировать» эти материалы в степени, достаточной для обеспечения технологической интеграции нанозлектронных процессорных и акустоэлектронных сенсорных элементов [5].

При этом в случае сверхпроводящей металлизации ВШП она сама может использоваться в качестве температурочувствительного переключающего элемента сенсорной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Мешков Ю.В. Микроэлектронные преобразователи информации на поверхностных акустических волнах.- М.: Электроника, 1985.
2. Колешко В.М., Белицкий В.Ф. Массоперенос в тонких пленках. – Мн.: Наука и техника, 1980.
3. V.M.Kolshko, V.V.Barkalin. Strain-effect in SrTiO3 based SAW

structures with HTSC electrodes. - In: Proc. All-Union Conf. "Surface'89", Chernogolovka, 1989, p.48. 4. V.M.Koleshko, V.V.Barkalin. Strain effect in the $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin film based surface acoustic wave structures. - Thin Solid Films 298 (1997) 1-8. 5. Колешко В.М., Баркалин В.В., Полинкова Е.В. Элементная база микроэлектромеханических сенсорных систем на поверхностных акустических волнах// Машиностроение. - Мн., 2000, - Вып.16.- С.72-78.

УДК 621.3.049.77

В.М. Колешко, В.В. Ковалевский

КОМПЬЮТЕР И МОЗГ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В ходе эволюции мозг человека достиг высочайшей степени совершенства как чрезвычайно эффективная информационно-управляющая система с исключительной надежностью функционирования (рис. 1а). Поэтому естественны и закономерны предпринимаемые попытки использовать достижения современной техники и технологии для моделирования работы мозга и создания на этой основе принципиально новых систем обработки и хранения информации. Мозг может быть рассмотрен как адаптивная вычислительная среда (рис. 1б), в силу чего появляется необходимость описать этот орган в терминах электроники [1].

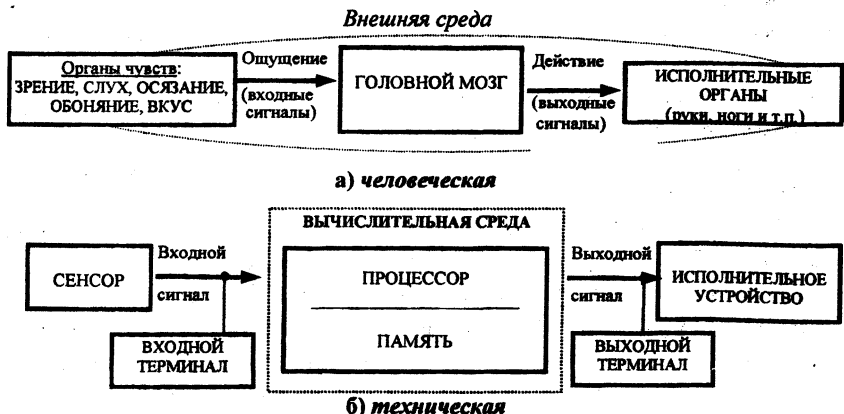


Рис. 1. Системы обработки информации