

06

Исследование частотных свойств твердотельных слоистых структур в составе приборов с зарядовой связью

© В.П. Заярный

Волгоградский государственный университет
E-mail: rrn2000@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 июля 2001 г.

Исследовалось влияние зарядовых процессов в твердотельных слоистых структурах типа "металл–поликремний–диэлектрик–полупроводник" на частотные свойства приборов с зарядовой связью, выполненных на их основе, при воздействии электрического поля радиочастотного диапазона. Полученные зависимости неэффективности переноса заряда от характеристик зарядовых процессов твердотельных структур позволяют судить о возможности применения приборов с зарядовой связью на высоких и сверхвысоких частотах. Влияние факторов, определяющих низкочастотную границу работы приборов с зарядовой связью, не исследовалось.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) на основе гетерогенных слоистых структур (в нашем случае типа "металл (Al)–поликремний (Si*)–диэлектрик (SiO₂)–полупроводник (Si)") представляют собой их периодическую последовательность, на которую подаются сдвинутые по фазе импульсы переноса зарядовых пакетов [1]. Для работы ПЗС в высокочастотной области радиодиапазона необходимо, чтобы частота сигналов переноса зарядовых пакетов и скорость протекания зарядовых процессов в гетероструктурах были соответствующими. В [1] утверждается, что высокочастотные свойства ПЗС определяются следующими физическими механизмами. Для относительно малых зарядовых пакетов доминирующим механизмом переноса заряда является термодиффузия. При этом полный заряд уменьшается экспоненциально с постоянной времени $\tau = 4L^2/\pi^2 D_n$ (L — длина электрода переноса, а D_n — коэффициент диффузии неосновных носителей заряда).

Перемещение относительно больших зарядовых пакетов происходит за счет самоиндуцированного дрейфа в продольном электрическом поле,

пропорциональном градиенту поверхностной плотности сигнального заряда. Однако даже в отсутствие сигнального заряда, под электродом переноса на границе с диэлектриком существует продольное (краевое) электрическое поле, способствующее ускорению перемещения заряда на последней стадии его переноса, когда самоиндуцированное поле уже меньше краевого [2–4].

Таким образом, повышение частотных свойств ПЗС можно достичь, уменьшая длину затвора L или используя полупроводники с наибольшей подвижностью заряда (наилучший вариант — арсенид галлия). В последнем случае ПЗС-структуры могут работать на частотах до 500 МГц при обеспечении неэффективности переноса заряда $\varepsilon_{ss} \approx 10^{-4}$. В [2] показано, что усилением краевого электрического поля можно повысить рабочую частоту ПЗС до 1 ГГц, однако проблема дальнейшего повышения быстродействия ПЗС в литературе не исследуется. Если исходить из предположения, что на сверхвысоких частотах ПЗС-структуры обладают свойствами микрополосковых (копланарных [5]) линий, то, используя их электродинамические свойства, можно существенно усилить влияние краевых полей на перемещение зарядовых пакетов в продольном направлении структуры и, следовательно, увеличить быстродействие ПЗС. Однако это возможно в случае минимизации влияния зарядовых процессов на разрешенных состояниях моноэнергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника.

На рис. 1 приведена экспериментально установленная зависимость неэффективности переноса зарядовых пакетов ε_{ss} исследовавшихся образцов линейных ПЗС (определялась по методике, приведенной в [1]) от усредненной плотности поверхностных состояний полупроводника вблизи границы раздела "диэлектрик–полупроводник" $N_{ss}(E)$. Для них наилучшие и наихудшие значения неэффективности переноса зарядовых пакетов получались соответственно при наилучших и наихудших усредненных значениях $N_{ss}(E)$. Эта характеристика определялась при постоянных значениях частоты тактовых импульсов ($f = 10^5$ Hz), от которых формируются импульсы переноса заряда, и числа переносов зарядовых пакетов в линейке ПЗС ($n = 32$). При этом было установлено, что в режиме формирования сигналов изображения ПЗС имеют удовлетворительную работоспособность до граничного значения неэффективности переноса зарядовых пакетов порядка $\varepsilon_{ss1} = 5 \cdot 10^{-3}$. На приведенном графике значению ε_{ss1} соответствует усредненное значение плотности поверхностных состояний

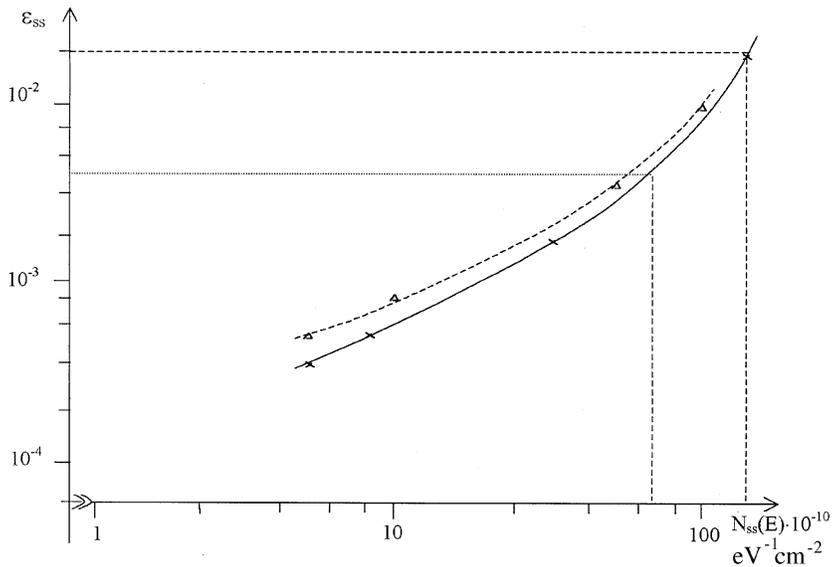


Рис. 1. Зависимости неэффективности переноса зарядовых пакетов ПЗС от усредненной плотности поверхностных состояний (сплошная линия — экспериментальная кривая, штриховая — расчетная).

гетероструктур, на основе которых выполнены исследовавшиеся ПЗС, $N_{ss1}(E) = 6.5 \cdot 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. В случае логической обработки сигналов, ПЗС сохраняют работоспособность до $\varepsilon_2 = 2 \cdot 10^{-2}$, чему соответствует значение $N_{ss2}(E) = 1.1 \cdot 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Соответствующая теоретическая зависимость описывается соотношением [2]:

$$\varepsilon_{ss} = (qkTN_{ss}/C_dV_g) \ln(p + 1), \quad (1)$$

где q — единичный заряд, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, C_dV_g — поверхностная плотность сигнального заряда, p — число фаз у используемого ПЗС. В нашем случае для значений $C_d \approx 110 \text{ pF}$, $V_g = 10 \text{ V}$, $p = 3$ она имеет вид, приведенный на этом же рисунке (штриховая линия). Имеющиеся расхождения кривых объясняются методической погрешностью при использовании соотношения (1).

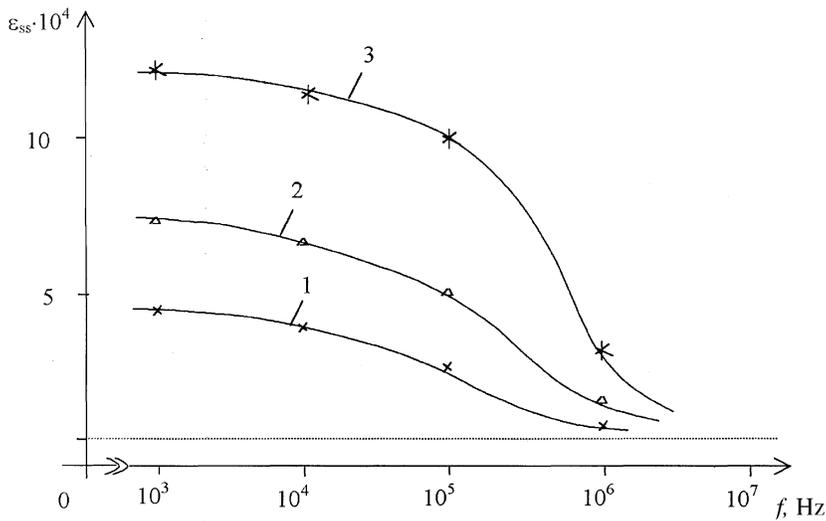


Рис. 2. Зависимость неэффективности переноса заряда ПЗС, обусловленной влиянием поверхностных состояний гетероструктур вблизи границы раздела "диэлектрик-полупроводник", от тактовой частоты: 1 — $N_{ss} = 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$, 2 — $N_{ss} = 8 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$; 3 — $N_{ss} = 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$.

Зависимость неэффективности переноса зарядовых пакетов, обусловленной наличием поверхностных состояний в полупроводнике вблизи границы раздела "диэлектрик-полупроводник", от тактовой частоты, с ее увеличением имеет тенденцию к уменьшению. На рис. 2 приведены экспериментально полученные подобные зависимости для разных значений плотности поверхностных состояний. Уменьшение неэффективности переноса зарядовых пакетов объясняется тем, что с увеличением частоты f уменьшается концентрация активных ловушек относительно их общего числа. Характер приведенных зависимостей однозначно свидетельствует о том, что с увеличением частоты тактовых импульсов ϵ_{ss} уменьшается тем быстрее, чем больше значение N_{ss} , и совсем слабо проявляется после 10^7 Hz .

На более высоких частотах сказываются только зарядовые процессы, обусловленные наличием моноэнергетических уровней в приповерх-

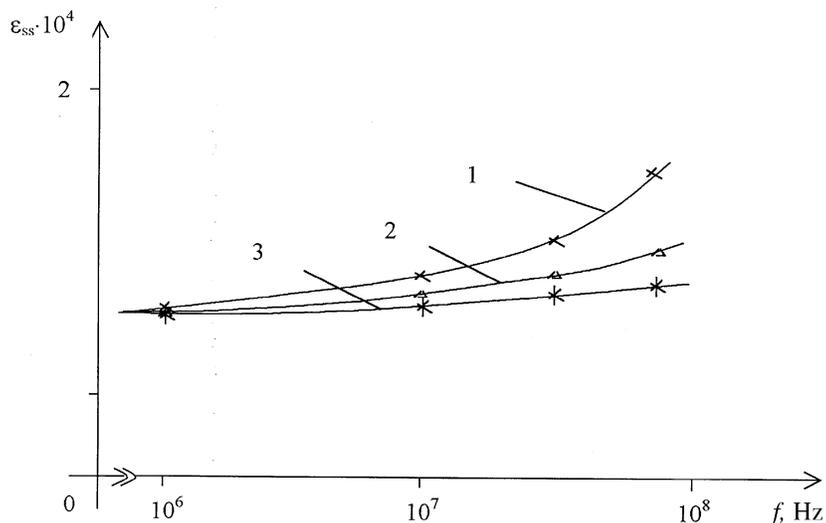


Рис. 3. Зависимость неэффективности переноса заряда ПЗС, обусловленной влиянием моноэнергетических уровней вблизи границы раздела "диэлектрик-полупроводник", от тактовой частоты (1 — $\omega_e = 10^8 \text{ s}^{-1}$; 2 — $\omega_e = 10^9 \text{ s}^{-1}$; 3 — $\omega_e = 10^{10} \text{ s}^{-1}$).

ностной области полупроводника, для которых частотный фактор может иметь значения более 10^7 Hz (может достигать значения 10^{12} Hz [5]). Экспериментально полученная зависимость ε_{ss} от f для различных значений эффективного частотного фактора ω_e приведены на рис. 3 (порядок кинетики m во всех случаях был близок к единице). Из графика видно, что при увеличении частоты f в диапазоне СВЧ влияние моноэнергетических уровней, для которых значения $\omega_e > 10^7 \text{ Hz}$, приводит к некоторому увеличению ε_{ss} , что ухудшает качество работы ПЗС. При меньших значениях ω_e увеличение неэффективности переноса заряда происходит на более низких частотах и наоборот. Это объясняется тем, что за время активности сигнала переноса заряда часть его не успевает высвободиться из ловушек. Чем больше тактовая частота, тем меньше вероятность эмиссии захваченного заряда из ловушек, что приводит к увеличению ε_{ss} .

Характер приведенных зависимостей хорошо согласуется с эмпирическими выражениями, полученными из следующих рассуждений. Пусть неэффективность переноса зарядовых пакетов определяется отношением захваченного на ловушках остаточного заряда к полному объему заряда в зарядовом пакете. Имеющийся пик термостимулированного тока деполяризации $I(T)$ для данного моноэнергетического уровня при $m = 1$ описывается выражением [5]:

$$I(T) = - (q\omega_e r^2 / 2L_0)(1 - r/L_0)n_{i0} \times \exp \left[-E_t/kT - \int_{T_0}^T (\omega_e/\beta) \exp(-E_t/kT') dT' \right], \quad (2)$$

где r и L_0 — толщины области локализации объемного заряда и образца; n_{i0} — начальная концентрация носителей заряда, локализованного на ловушках; β — скорость нагрева образца; E_t — энергия активации моноэнергетического уровня, T_0 и T — начальная и текущая температуры, T' — температурный параметр интегрирования. Тогда, с учетом (2) и числа переносов зарядового пакета, неэффективность переноса заряда определим следующим образом:

$$\varepsilon_{ss} \approx n \left[kT_m \int_{T_0}^{T_k} I(T)/\beta dt \right] / \{ E_t C_d V_g \exp[1 - \ln(f/\omega_e)] \},$$

где T_m , T_k — температурные положения максимума и окончания пика термостимулированного тока деполяризации, E_t — энергия активации ловушек моноэнергетического уровня.

Определение приведенных характеристик производилось для ПЗС на основе гетероструктур, имевших наибольший эффективный частотный фактор $\omega_e = 10^{10} \text{ s}^{-1}$, что не является его предельным значением. Поэтому при увеличении значения ω_e следует ожидать расширения частотного диапазона ПЗС. При увеличении тактовой частоты до значений, превышающих значение ω_e , следует ожидать снижения активности ловушек на данном моноэнергетическом уровне.

Из установленных частотных зависимостей характеристик, определяющих зарядовое состояние исследовавшихся гетероструктур и ПЗС на их основе видно, что влияние поверхностных состояний сказывается до

единиц мегагерц. На более высоких частотах их влияние пренебрежимо мало. В диапазоне СВЧ на частотных свойствах ПЗС сказывается только наличие моноэнергетических уровней. Ухудшение качества работы ПЗС вызывают моноэнергетические уровни, имеющие меньшие значения ω_e . Наоборот, их наличие в полупроводнике гетероструктуры с большим значением ω_e на качестве работы ПЗС может практически не сказываться. Следует отметить, что с увеличением частоты переноса заряда качество работы ПЗС тем выше, чем меньше порядок кинетики, т. е. чем слабее перезахват носителей заряда.

Из приведенных результатов также следует, что на высоких и сверхвысоких частотах могут оказаться работоспособными ПЗС, которые неработоспособны на более низких частотах, что особенно важно при создании ПЗС для работы в составе объемных интегральных схем СВЧ/КВЧ-диапазона [3].

Список литературы

- [1] *Приборы с зарядовой связью* / Пер. с англ. Под ред. Д.Ф. Барба. М.: Мир, 1982. 240 с.
- [2] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. / Пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [3] *Гвоздев В.И., Нефедов Е.И.* Объемные интегральные схемы СВЧ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. 256 с.
- [4] *Неганов В.А., Раевский С.Б., Яровой Г.П.* Линейная макроскопическая электродинамика / Под ред. Неганова В.А. Т. 1. М.: Радио и связь, 2000. 509 с.
- [5] *Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А.* Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 248 с.