

06.2

Влияние толщины окисла на быстродействие полевого транзистора в терминах скорости туннелирующих носителей заряда

© М.А. Градо-Каффаро, М. Градо-Каффаро

Sapienza S.L. (scientific consultants), C/Julio Palacios 11, 9-B,
28029 Madrid (Spain)

Поступило в Редакцию 11 февраля 2002 г.

В окончательной редакции 15 апреля 2002 г.

Вводится параметр, характеризующий изменение скорости туннелирующих через окисел электронов с изменением толщины окисла. Данный параметр может быть привлечен при рассмотрении вопросов быстродействия n -канальных полевых транзисторов с управляющим и плавающим затвором. Проведена оценка введенного характеристического параметра для наиболее актуальных экспериментальных ситуаций.

Введение. Использование полевых транзисторов в элементах памяти для слаботочных микроконтроллеров обеспечивает ряд существенных преимуществ. Поскольку работа таких приборов основана на протекании туннельного тока через слой окисла, толщина последнего t_{ox} является важнейшим фактором, определяющим функционирование транзистора в самых различных его аспектах. Например, в работе [1] обсуждалась проблема выхода годных образцов во взаимосвязи с толщиной диэлектрика.

В настоящем сообщении изучается быстродействие прибора, для чего вводится специальный параметр, характеризующий влияние толщины окисла на скорость движения туннелирующих электронов v . При этом выясняется, что такой параметр „чувствительности v к t_{ox} “ тождественен параметру, вводимому в математически аналогичной форме и выражающему зависимость плотности туннельного тока от t_{ox} .

Теория. Выражение для туннельного тока через окисел хорошо известно [1–5] и имеет — применительно к n -канальному полемому

транзистору Al/SiO₂/Si — вид:

$$j = \frac{e^3 m_0 E^2}{16\pi^2 \hbar m_n^* E_b} \cdot \exp \left[-\frac{4(2m_n^* E_b^3)^{1/2}}{3e\hbar E} \right], \quad (1)$$

где e — элементарный заряд, E — напряженность электрического поля в окисле, m_0 — масса свободного электрона, m_n^* — эффективная масса туннелирующего электрона, \hbar — постоянная Планка, деленная на 2π , а E_b — высота туннельного барьера со стороны катода. С учетом соотношений $E = V_{ox} t_{ox}$ и $j = env$, где v — скорость электронов, а n — их объемная концентрация в барьере (см., например, [1,3,4]), из равенства (1) следует

$$V \approx \frac{e^2 m_0 E_b^{-1} V_{ox}^2}{16\pi^2 \hbar m_n^* n t_{ox}^2} \cdot \exp \left[-\frac{4(2m_n^* E_b^3)^{1/2} t_{ox}}{3e\hbar V_{ox}} \right]. \quad (2)$$

Формула (2) применима для напряжений на окисле $V_{ox} > E_b/e$.

Введем параметр, характеризующий относительное изменение скорости носителей при изменении толщины t_{ox} :

$$s \equiv \left| \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt_{ox}} \right|. \quad (3)$$

Значение данного параметра может служить своеобразным критерием, если, например, требуется выявить диапазон толщины окисла, в котором скорость v (и, следовательно, быстродействие прибора) будет сильно чувствительной к t_{ox} . Из (3) при подстановке (2) имеем:

$$s \approx \frac{2}{t_{ox}} + \frac{4(2m_n^* E_b^3)^{1/2}}{3e\hbar V_{ox}}, \quad (4)$$

где $m_n^* \approx m_0$, а $E_b \approx 3.2$ eV. Заметим, что характеристический параметр s определен как абсолютная величина соответствующего выражения (оно принимает только отрицательные значения).

Для получения численной оценки s выберем $V_{ox} = 4$ V, что соответствует реальной ситуации в реальных приборах. При $V_{ox} = 4$ V и $t_{ox} \sim 100$ Å туннельный ток уже вполне заметен [1,3,4], в то время как, скажем, при $V_{ox} \sim 3.2$ V, отвечающем границе применимости выражения (1), этот ток пренебрежимо мал. Величину для E_b (3.2 V) можно рассчитать исходя из известного значения разницы энергий

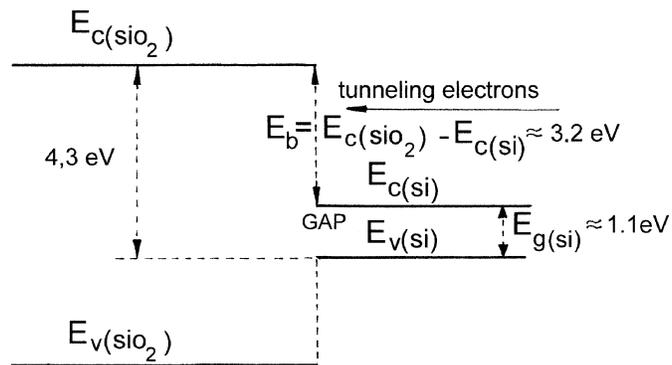


Рис. 1. Энергетическая зонная диаграмма системы Si/SiO₂.

между краем зоны проводимости SiO₂ и краем валентной зоны; последняя равна 4.3 eV при комнатной температуре (см., например, [6–8]). $E_b = E_{c(\text{SiO}_2)} - E_{c(\text{Si})} = 4.3 - 1.1 = 3.2 \text{ eV}$ (рис. 1). Таким образом, для $V_{ox} = 4 \text{ V}$ и $E_b = 3.2 \text{ eV}$ численно получаем:

$$s \approx 0.98 + \frac{2}{t_{ox}}, \quad (5)$$

где t_{ox} и s выражены в \AA и \AA^{-1} соответственно.

В работе [7] был введен параметр $s_{\mu n} = |\mu_n^{-1}(d\mu_n/dt_{ox})|$, характеризующий зависимость дифференциальной подвижности электронов $\mu_n = (en)^{-1}(dj/dE)$ от толщины SiO₂; отсюда по определению подвижности $\mu_n = dv/dE$ приходим просто к $j = env$. Для $s_{\mu n}$ мы тоже можем получить соотношение типа (5) [7], хотя постоянный член в правой части, конечно же, не совпадает с тем, который выписан выше для s . Зависимости $s_{\mu n}(t_{ox})$ и $s(t_{ox})$ имеют одинаковый графический вид. Это обстоятельство очень существенно, поскольку свойства соотношения (5) оказываются такими же, как и у $s_{\mu n} = (t_{ox})$, для которого физическое содержание и возможности использования были подробно исследованы в [7].

Выражение (5) полезно для практического изучения быстрдействия прибора. При этом наиболее интересным является диапазон толщины $t_{ox} = 100\text{--}400 \text{ \AA}$ [1,3]; именно для этого диапазона [1] изучался выход годных приборов с использованием достаточно большого количества образцов.

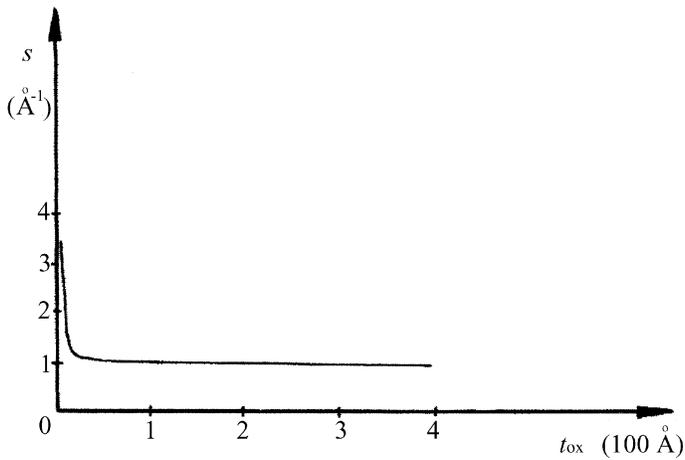


Рис. 2. Зависимость характеристического параметра s от t_{ox} при фиксированном $V_{ox} = 4$ V.

Укажем еще на одно обстоятельство, принципиальное для элементов памяти в микроконтроллерах, работающих при малых напряжениях. Авторами [1] высказывалось опасение, что при понижении напряжения истока от 5 до 3 V соответствующее напряжение для накачки заряда, управляющее напряжение затвора и напряжение на туннельном окисле также понижаются; уменьшение при этом туннельного тока электронов на плавающий затвор (формула (1)) приведет к замедлению режима считывания и возможному отказу элемента [1,3,4]. Анализируя формулу (4), легко заметить, что вышеупомянутое снижение V_{ox} , напротив, сопровождается увеличением s , если толщина окисла t_{ox} постоянна.

На рис. 2 представлена кривая, соответствующая формуле (5), в наиболее актуальном диапазоне изменения t_{ox} , в том числе при $t_{ox} \approx 100 \text{ \AA}$ [1,3,4]. Можно сказать, что выражение (5) служит инструментом для исследования зависимости скорости v от толщины окисла d_{ox} , если d_{ox} рассматривается как аргумент [7]. Правая часть (5) — это сумма постоянной величины и члена, обратно пропорционального толщине.

Характеристический параметр s можно было бы определить и несколько иначе, а именно как $s = |j^{-1}(dj/dt_{ox})|$, что с учетом соотношения $j = env$ дает выражение $s = |v^{-1}(dv/dt_{ox})|$, введенное выше.

Определение s через производную тока позволяет обойти методические проблемы, связанные с несоответствием между скоростью в соотношении $j = env$ и скоростью, получаемой по правилам квантовой механики с волновыми функциями в модели Фаулера–Нордгейма (1). Заметим также, что концентрация n , пропорциональная связанной с волновыми функциями плотности вероятности, выпадает из выражения для параметра s .

Заключение. Для анализа быстродействия полевых транзисторов введен параметр s , количественно характеризующий чувствительность скорости туннелирующих носителей к толщине окисла. Из равенства (5) следует, что при $t_{ox} > 100 \text{ \AA}$ этот параметр почти не зависит от t_{ox} (в частности, $s \approx 1 \text{ \AA}^{-1}$ при $t_{ox} \approx 100 \text{ \AA}$), в то время как при $t_{ox} \ll 100 \text{ \AA}$ имеет место заметное возрастание s с уменьшением толщины (рис. 2). Такое поведение s связано с сильной зависимостью плотности тока j от напряженности поля E . В процессе рассмотрения мы приняли $m_n^* = m_0$ для эффективной массы электрона в окисле, что примерно соответствует значению $m_n^* = 0.84m_0$ из работы [8]. Укажем еще, что теоретическая сторона нашей работы тесно связана с публикациями [9–12].

Список литературы

- [1] *Ku J.W., Chao S.C.* // Semiconductor Int. May 1997. P. 105–110.
- [2] *Sze S.M.*: Physics of semiconductor devices. Second edition. Wiley, 1981.
- [3] *Chen I., Holland S., Hu C.* // IEEE Trans. Electron Dev. 1985. ED-32. P. 413.
- [4] *Grado-Caffaro M.A., Grado-Caffaro M.* // Act. Pass. Electronic Comp. 1998. V. 20. P. 165–167.
- [5] *Grado-Caffaro M.A., Grado-Caffaro M.* // Act. Pass. Electronic Comp. 1998. V. 21. P. 57–60.
- [6] *Deal B.E., Snow E.N., Mead C.A.* // J. Phys. Chem. Solids. 1966. V. 27. P. 1873.
- [7] *Grado-Caffaro M.A., Grado-Caffaro M.* // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 1999. V. 5. P. 1–2.
- [8] *Mao L.F., Wei J.L., Tan Ch.H., Xu M.Zh.* // Solid State Commun. 2000. V. 114. P. 383–387.
- [9] *Tang J., Hess K.* // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. P. 5145–5151.
- [10] *Pavan P., Bez R., Olivo P., Zanoni E.* // Proc. IEEE. 1997. V. 85. P. 1255.
- [11] *Maserjian J., Zamani N.* // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. 559.
- [12] *Maserjian J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1974. V. 11. P. 996.