

## Анализ электрофизических характеристик резонансно-туннельных диодов на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник

*Представлены результаты измерения вольт-амперных характеристик структур Al/SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>Si с термическим и электрохимическим окислом, функционирующих как резонансно-туннельный диод. Характеристики демонстрируют особенности в виде ступеней и пиков тока. Выполненное моделирование позволяет связать данные особенности с резонансным транспортом электронов между валентной зоной кремния и металлом через приповерхностные уровни квантовой ямы и состояний на межфазовой границе SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>Si. Рассматриваемая структура интересна как СВЧ прибор, отличающийся от традиционных резонансно-туннельных диодов более простым сочетанием простых материалов, используемых в кремниевой интегральной электронике.*

**Ключевые слова:** Резонансно-туннельный диод, структура металл-диэлектрик-кремний, квантовая яма, поверхностные состояния, математическое моделирование.

Резонансно-туннельные диоды (РТД) являются перспективными твердотельными приборами СВЧ-диапазона [1]. Обычно РТД реализуются с использованием достаточно сложных гетеросистем на основе материалов А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> и некоторых других [1]. Однако, как было недавно показано нами, эффект РТ может при определенных условиях иметь место в сравнительно простой и хорошо известной структуре Металл-Диэлектрик-Полупроводник (МДП) на базе сильнолегированного р-кремния [2]. В настоящей работе выполнен более обстоятельный анализ поведения образцов МДП-РТД и дана интерпретация совокупности наблюдаемых экспериментальных особенностей.

Условия для РТ создаются в режиме обеднения или инверсии МДП-структуры, когда изгиб зон  $q\phi_s$  в Si достаточно велик. РТ электронов может происходить между валентной (v-) зоной кремния и металлом через приповерхностные дискретные уровни  $E_n$  (Рис. 1). Изначально считалось [2], что эти уровни  $E_n = E_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) принадлежат квантовой яме с-зоны p<sup>+</sup>Si, расположенной между двумя барьерами: окисла и неравновесно обедненной области кремния. Но, по-видимому, наряду с  $E_i$  в РТ могут участвовать и поверхностные состояния (ПС)  $E_n = E_{ti}$  на границе Si-диэлектрик. Конкретный уровень  $E_n$  (отсчет – от  $E_{c0}$ ) вовлекается в РТ при выполнении соотношения  $q\phi_s - E_g > E_n$ . Направление переноса электронов задается полярностью внешнего напряжения  $V$ . Величина и поведение РТ тока при изменении  $V$ , то есть вольт-амперная характеристика (ВАХ) диктуются соположением энергий Ферми  $E_{Fb|m}$  толщи кремния и металла. Если  $E_{Fb} > E_{Fm}$  (напряжение на клеммах  $V > 0$ ), то и эмиттер, и коллектор электронов имеют большую энергетическую ширину – и вовлечение очередного уровня в РТ отражается ступенью ВАХ. Напротив, при  $E_{Fb} < E_{Fm}$  ( $V < 0$ ) электроны коллектируются узкой полосой энергетических состояний ниже края v-зоны  $E_{v\infty}$  толщи Si – и на ВАХ могут появляться пики тока.

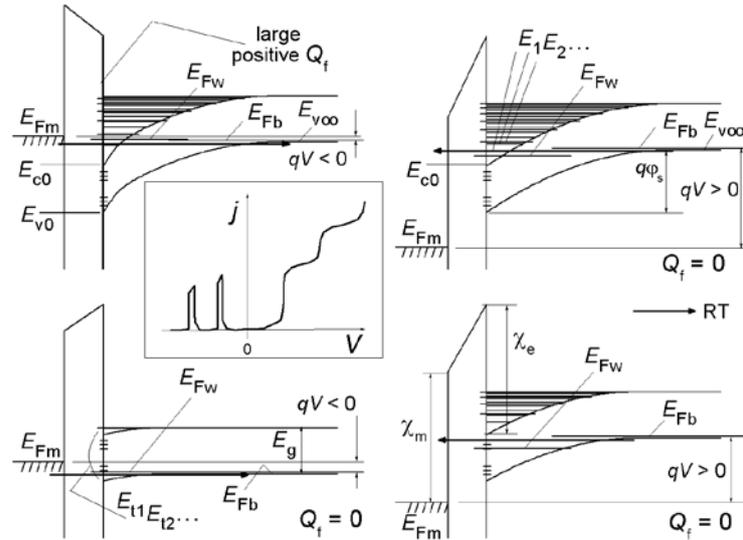


Рис. 1. Зонные диаграммы МДП-РТД структуры, поясняющие природу РТ эффекта. Напряжения для всех диаграмм подобраны так, чтобы они отвечали активации РТ через какой-то уровень.

Подобное поведение МДП-структур неоднократно наблюдалось в эксперименте. На Рис. 2 показаны типичные ВАХ образцов Al/SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>Si ( $N_A \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ), демонстрирующие обсуждаемые особенности РТ. Напряжение плоских зон  $V_{FB}$  составляет примерно -1 В. Туннельно-тонкий слой SiO<sub>2</sub> в измеренных структурах формировался либо термическим, либо электрохимическим окислением. На качественном уровне поведение образцов при  $V > 0$  не зависело от выбранной технологии, однако на участке  $V_{FB} < V < 0$  пики тока были более характерны для случая электрохимического окисла.

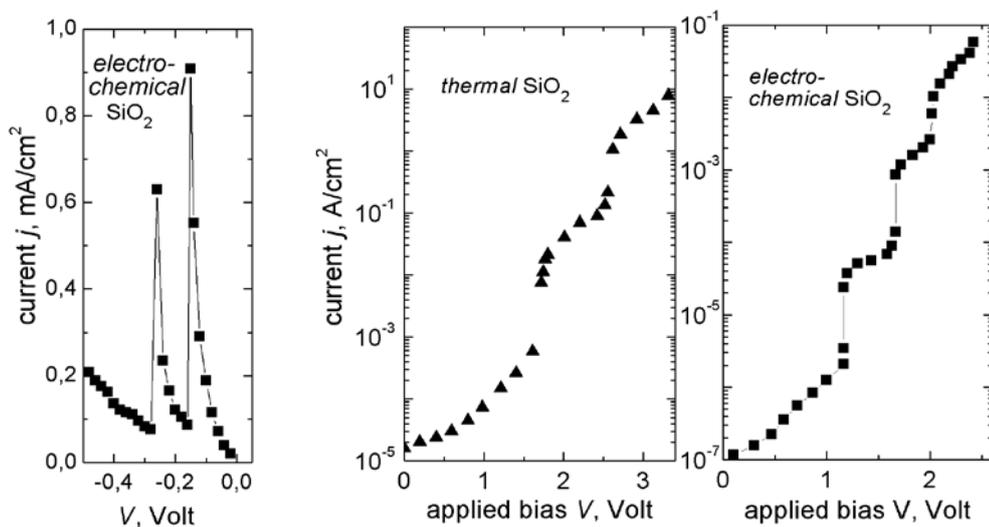


Рис. 2. Измеренные ВАХ МДП-РТД структур с особенностями в виде ступеней и пиков тока.

Напряжение первого подъема тока при положительных  $V$  варьировалось в пределах 1.0 – 2.5 Вольт (структурам с термическим SiO<sub>2</sub> свойственны сравнительно более высокие значения), причем с увеличением толщины диэлектрика  $d$  подъем закономерно сдвигался вправо по оси напряжений.

Можно констатировать, что эксперимент подтверждает реальность применения МДП-структуры как РТД. Способствующими факторами выступают большая глубина и

одновременно узость КЯ: энергетическое разделение подзон оказывается достаточным, чтобы отчетливо проявиться. Относительно высокие напряженности электрического поля обеспечивают быстрое действие. По сравнению с традиционными РТД, МДП-РТД являются простыми наноструктурами, близкими по материалам и дизайну элементам кремниевой интегральной электроники, в схемы которой их можно встроить. Целенаправленным подбором параметров в таких структурах, видимо, можно реализовать электрофизическую самоорганизацию и получить биполярный РТД, а изменением площади или конфигурации металлического электрода варьировать размерность электронного газа в КЯ.

Надежность МДП-РТД и повторяемость его характеристик в значительной степени определяются совершенством гетероперехода  $p^+Si/SiO_2$ . Для оптимизации технологии пока сделано слишком мало, и Рис. 2 следует воспринимать только как качественную демонстрацию. Термическое окисление, являясь высокотемпературным процессом, плохо подходит для сильнолегированного Si; низкотемпературное электрохимическое окисление загрязняет диэлектрик продуктами, выделяющимися при сопутствующих реакциях. Нами рассматриваются пути модернизации электрохимического метода формирования окисла, позволяющие добиться выравнивания толщины и стехиометрии.

Для более детальной интерпретации экспериментальных данных было выполнено моделирование РТ транспорта в МДП-РТД. Задаваемыми параметрами являются  $N_A$ ,  $d$ , плотности ( $cm^{-2}$ )  $N_{t1}$ ,  $N_{t2}, \dots$  и энергии  $E_{t1}, \dots$  ПС, время жизни  $\tau_t$  на них. Высоты барьеров  $\chi_e = 3.15$  эВ,  $\chi_m = 3.17$  эВ (Рис. 1),  $E_{g[SiO_2]} = 8.9$  эВ. При анализе профиля потенциала уровни квантовой ямы (КЯ) определяются квазиклассически.

Общий алгоритм расчета характеристик МДП-структур, изложенный в [3], теперь дополняется вычислением тока РТ. Последний состоит из тока  $j_w^{RT}$  через уровни КЯ и тока  $j_t^{RT}$  через уровни ПС. Предполагается, что концентрации носителей  $N_1, N_2, \dots$  на уровнях  $E_i$  КЯ распределены в соответствии с функцией Ферми  $f_w(E, E_{Fw})$ . Упомянутые концентрации и энергия Ферми  $E_{Fw}$  находятся из условия баланса суммарного (по всем уровням) прихода и суммарного ухода электронов в КЯ посредством туннелирования из  $v$ -зоны и в металл, соответственно. Что касается ПС, то, в отличие от случая рассмотрения КЯ, степени их заполнения электронами  $v_{t1}, v_{t2}, \dots$  находятся из условия баланса приход-уход для каждого состояния  $E_{ti}$  в отдельности. С учетом того, что ПС в верхней половине запрещенной зоны являются акцепторными, а в нижней половине – донорными, заряд ( $Кл \cdot cm^{-2}$ ) электронов в КЯ и поверхностных состояний равен  $Q_s = -qN_s = q[-\sum N_i - \sum v_{ti} N_{ti}|_{E_{ti} > -E_g/2} + \sum (1 - v_{ti}) N_{ti}|_{E_{ti} < -E_g/2}]$ . Помимо  $Q_s$ , в кремнии присутствует заряд обедненной области  $Q_{depl} = -qwN_A$  ( $w$  – ширина), а в окисле, возможно, относительно неподвижный заряд  $Q_f$ . Заряд на границе Al/SiO<sub>2</sub> составляет  $-(Q_s + Q_f + Q_{depl})$ . Кроме резонансного тока, в МДП-РТД текут избыточные токи  $v$ -зона – металл и  $s$ -зона – металл, не представляющие новизны.

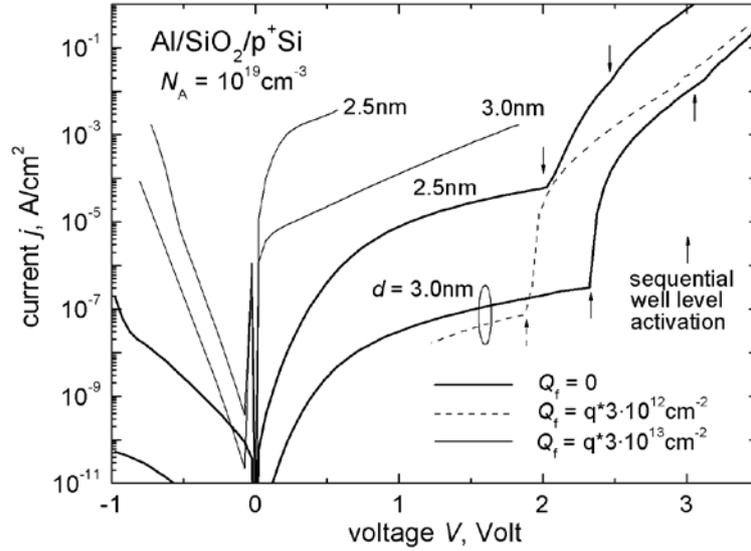


Рис. 3. ВАХ МДП-РТД структур, рассчитанные в модели с учетом только уровней КЯ.

Результаты вычислений ВАХ в рамках только что описанной модели, но без учета ПС приведены на Рис. 3. Можно отметить качественное согласие с экспериментом при  $V > 0$ : в расчете тоже появляются ступени тока, хотя измеренные кривые  $j(V)$  характеризуются более резкими подъемами. Применительно к структурам с термическим окислом (ср. Рис. 2) модель неплохо воспроизводит и напряжение активации РТ через уровень  $E_1$ . Правда, иногда, особенно для образцов с электрохимическим  $\text{SiO}_2$ , первый подъем тока появляется раньше, а уже второй отвечает первому расчетному. Еще более серьезное несоответствие заключается в отсутствии на Рис. 3 немонотонностей при  $V < 0$ . Чтобы все же получить хотя бы один пик  $j(V)$  без поверхностных состояний, приходится вводить нереально большое  $Q_f$  (скажем  $+q \cdot 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), но тогда нет ступеней.

Наиболее стандартным допущением относительно свойств ПС в МДП-структуре является предположение о существовании одного или нескольких уровней ниже  $E_{c0}$  и чуть выше  $E_{v0}$  (см. Рис. 1). Для иллюстрации примем, что есть по три уровня ПС сверху и внизу с концентрациями  $10^{12}$ ,  $3 \cdot 10^{11}$  и  $10^{11} \text{ см}^{-2}$  и энергиями  $-0.15 \text{ эВ}$  (и  $-E_g + 0.15 \text{ эВ}$ ),  $-0.25 \text{ эВ}$  ( $-E_g + 0.25 \text{ эВ}$ ) и  $-0.35 \text{ эВ}$  ( $-E_g + 0.35 \text{ эВ}$ ), соответственно. Время жизни на них для определенности положим равным  $10^{-15} \text{ с}$ . Тогда удастся (Рис. 4) получить пики при  $V < 0$ , в качественном согласии с измерениями, а также дополнительные более ранние подъемы – в данном случае три рядом – при более низких напряжениях, чем было на Рис. 3. Разумеется, если бы мы допустили существование одного акцепторного ПС, около  $V = +1.3 \text{ В}$  появился бы ровно один подъем тока (кстати, подъемы могут «сливаться»). Заметим, что для получения кривых с пиками не пришлось приписывать ПС высокую плотность; их заряд мало влияет на зонную диаграмму – гораздо важнее их функция как транзитных состояний. Следовательно, ПС в МДП-РТД могут играть более интересную роль, чем роль паразитного фактора, искажающего напряжение  $V_{FB}$ , как в стандартных применениях МДП-структур. В области больших, чем на Рис. 4, напряжений ВАХ не отличаются от показанных на Рис. 3.

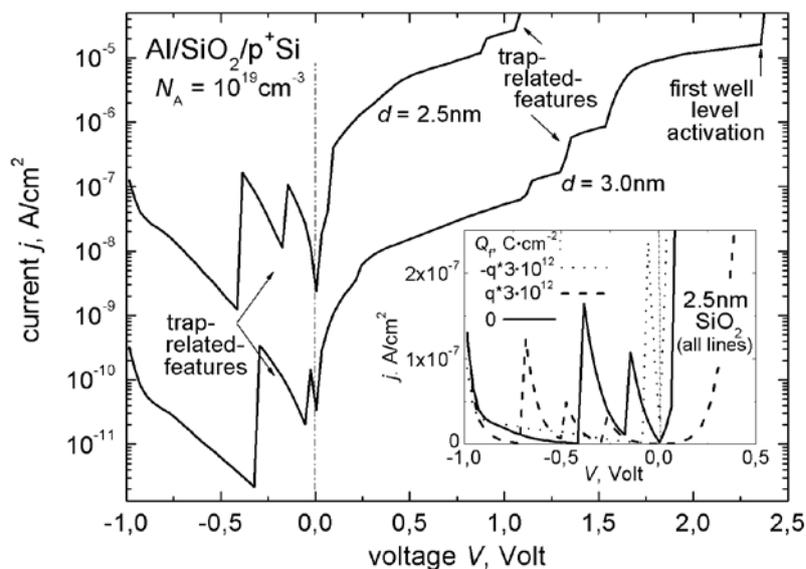


Рис. 4. ВАХ МДП-РТД около  $V = 0$ , рассчитанные с учетом и уровней КЯ, и уровней ПС. Врезка: оценка влияния фиксированного заряда  $Q_f$  в окисле (на основном Рис.  $Q_f = 0$ ).

В качестве дополнения укажем еще на один экспериментальный факт. Нами было замечено, что число пиков при  $V < 0$  может увеличиться, если структура предварительно подверглась приложению достаточно большого напряжения  $V > 0$  с выходом на первую (и тем более на вторую-третью) ступень тока. После же проведения измерения при  $V < 0$  пики зачастую не повторяются. Это типично для образцов с электрохимическим окислом и связывается нами с некоторыми изменениями заряда  $Q_f$  в  $\text{SiO}_2$ . А именно, при приложении положительного смещения на Al к интерфейсу  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  могут притягиваться положительно заряженные радикалы или ионы из окисла, которые при  $V < 0$  отходят от этого интерфейса или же замещаются отрицательными ионами. Как показал расчет (вставка в Рис. 4), вполне умеренные вариации  $Q_f$  могут изменить число особенностей левее нуля.

Следовательно, в работе продемонстрировано функционирование МДП-структуры как РТД и предложена интерпретация наблюдающихся особенностей ее ВАХ – ступеней и пиков тока, связанных с РТ электронов через дискретные уровни КЯ в области объемного заряда  $p^+\text{Si}$  и уровни ПС на границе раздела  $p^+\text{Si}/\text{SiO}_2$ .

#### Библиографический список

1. Sun J.P., Haddad G.I., Mazumder P., Schulman J.N. Resonant tunneling diodes: Models and properties. Proc. IEEE, v. 86, No. 4, pp. 641-660 (1998).
2. Kareva G.G., Vexler M.I., Illarionov Yu.Yu. Transformation of a metal-insulator-silicon structure into a resonant-tunneling diode. Microelect. Eng., v. 109, pp. 270-273 (2013).
3. Векслер М.И., Тягинов С.Э., Илларионов Ю.Ю., Yew Kwang Sing, Ang Diing Shenp, Федоров В.В., Исаков Д.В. Общая процедура расчета электрических характеристик туннельных МДП-структур. ФТП, т. 47, вып. 5, стр. 675-683 (2013).