

# Туннельный диод с отрицательным дифференциальным сопротивлением и кварцевым резонатором на базе конденсатора $p^+$ -Si/нано-SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si

© Г.Г. Карева<sup>\*†</sup>, М.И. Векслер<sup>+</sup>

<sup>\*</sup> Санкт-Петербургский государственный университет (физический факультет), 198504 Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Россия

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 декабря 2013 г. Принята к печати 13 марта 2014 г.)

В целях демонстрации расширения функциональных возможностей простейшего конденсатора металл–окисел–полупроводник рассматривается структура с гетеропереходом  $p^+$ -Si/нано-SiO<sub>2</sub>, в которой металлический электрод заменен сильно вырожденным  $n^+$ -Si. В результате получается туннельный диод с отрицательным дифференциальным сопротивлением и кварцевым резонатором, потенциально превосходящий соответствующий диод Эсаки по своим электрическим характеристикам, управляемым не только уровнем легирования, но и толщиной SiO<sub>2</sub>.

## 1. Введение

Исследования структур металл/полупроводник–диэлектрик–полупроводник (М/ПДП) в последнее время сосредоточились на проблемах, связанных с работой полевых транзисторов ([1,2] и др.), в которых такие структуры играют роль затворной секции. Предметом большинства новых статей являются характеристики образцов, выполненных на умеренно легированных (концентрация акцепторов  $N_A \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) подложках  $p$ -Si с вырожденным поликремниевым затвором. При вычислении токов первостепенное внимание уделяется утечке электронов из канала зоны проводимости ( $c$ -зоны).

Оказывается, однако, что заметная утечка носителей тока, от которой в современных транзисторах необходимо избавляться, может быть вполне управляемой и полезной в ряде других приборов. В нашей публикации [3] обращалось внимание на то, что МДП-структуры со слоем SiO<sub>2</sub> толщиной в несколько нанометров, изготовленные на подложках  $p$ -Si с  $N_A$  порядка  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , демонстрируют резонансно-туннельный механизм транспорта электронов и связанные с этим особенности. Иными словами, МДП-конденсаторы могут быть превращены в резонансно-туннельные диоды, что представляет немалый интерес для высокочастотной функциональной электроники.

Продолжая демонстрировать расширение функциональных возможностей М/ПДП-конденсаторов, в настоящей работе мы исследуем ПДП-структуры с еще большими концентрациями примеси, при которых имеет место вырождение обеих разнотипно легированных полупроводниковых областей (рис. 1). Указанные структуры  $p^+$ -Si/нано-SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si оказываются ничем иным, как туннельными диодами (ТД) с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) и SiO<sub>2</sub>-резонатором. Конструктивно, от известных  $p^+$ - $n^+$ -диодов Эсаки [4]

они отличаются появлением SiO<sub>2</sub>-прослойки нанометровой толщины ( $d = 0.8–2.4 \text{ нм}$ ) между  $p^+$ - и  $n^+$ -областями Si. Далее будут прослежена эволюция электрофизических свойств ПДП-диодов  $p^+$ -Si/SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si с ростом толщины окисла  $d$  при нескольких уровнях легирования Si, одинаковых для обоих типов ( $N_A = N_D$ ), и намечены пути улучшения рабочих параметров ТД.

## 2. Краткое описание диода $p^+$ -Si/SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si

На рис. 1 представлена схема конструкции исследуемого туннельного ПДП-диода  $p^+$ -Si/SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si. Прослойка переводит гомогенную структуру ТД Эсаки в гетерогенную с двумя гетеропереходами:  $p^+$ -Si/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si, что отражается на всех ее электрофизических свойствах. Так, из-за блокировки процесса диффузии в ПДП ТД, в отличие от диода Эсаки, до

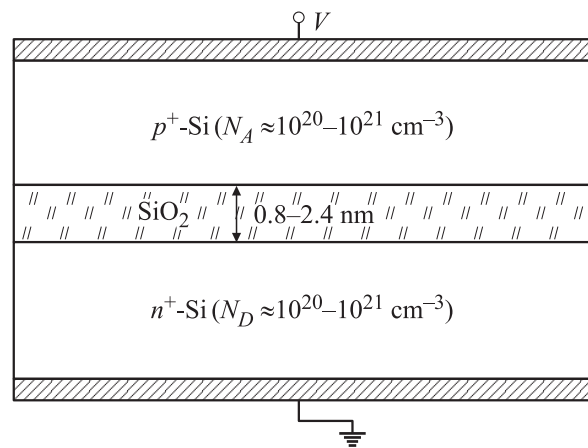
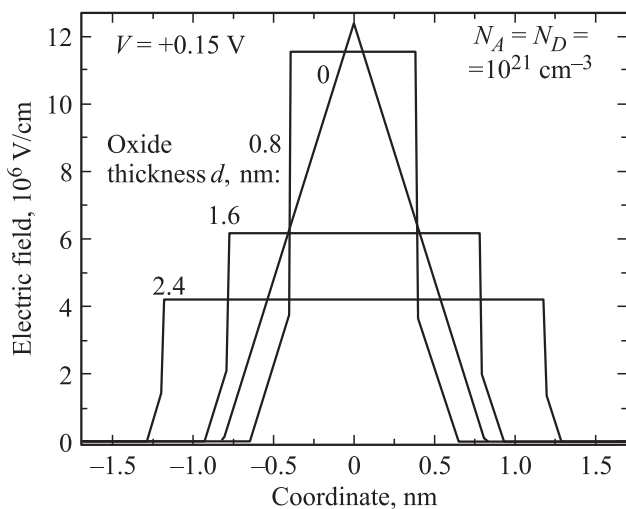


Рис. 1. Структура туннельного ПДП диода  $p^+$ -Si/нано-SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si.

<sup>†</sup> E-mail: galinakareva@mail.ru



**Рис. 2.** Распределения электрического поля в структурах  $p^+$ -Si/нано- $\text{SiO}_2/n^+$ -Si. Для иллюстрации взят режим вблизи максимума тока, а за начало отсчета координаты выбрана срединная плоскость  $\text{SiO}_2$ . При  $N_A = N_D$  распределение симметрично.

первичного замыкания клемм отсутствует равновесие и контактная разность потенциалов (КРП) близка к нулю. Только после замыкания появляются токи электронов и дырок, текущие соответственно из  $n^+$ - и  $p^+$ -областей через закороченный участок внешней цепи с последующим установлением диффузионно-дрейфового равновесия при напряжении нуль, и возникает КРП, равная по величине КРП ТД Эсаки. Но, в отличие от последнего, значительная часть КРП, как, впрочем, и любого внешнего приложенного напряжения  $V$ , падает на слое  $\text{SiO}_2$ .

На рис. 2 приведены вычисленные распределения электрического поля в структурах при изменении  $d$  от 0 до 2.4 нм. При расчете использовалось приближение обеднения для обеих кремниевых частей. Видно, что происходит передислокация поля из  $p^+$ - и  $n^+$ -областей на  $\text{SiO}_2$ . Из-за такой передислокации от полупроводниковой области пространственного заряда (ОПЗ) в ПДП ТД остаются только ее незначительные периферийные части, уменьшающие свою протяженность, величину изгиба зон и напряженности поля по мере роста толщины окисла. О масштабах уменьшений можно судить по соотношению размеров „треугольников“ ОПЗ на рис. 2 для диодов с разными  $d$ . Все, что происходит в этих местах и присуще ТД Эсаки, становится малозначительным либо полностью исключается. В частности, наноокислом блокируется протекание сквозных стационарных „избыточных“ токов: диффузионного тока электронов/дырок по зоне проводимости ( $c$ -) / валентной ( $v$ -) зоне кремния и „прыжкового“ тока через дефекты запрещенной зоны Si. Очень важно, что исключаются те компоненты, которым присущи высокие показатели по энергетическим диссипациям, приводящие к разогреву прибора.

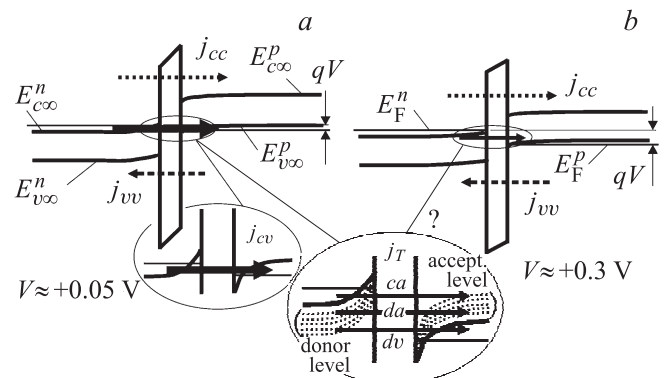
В противоположность сокращающейся ОПЗ, нарастающий по толщине окисел оказывается основным элементом наноструктуры, задающим не только распределения всех напряжений, но также механизм и величины протекающих токов. Единственным механизмом сквозного стационарного токопереноса в ПДП ТД становится туннелирование [5,6] электронов через барьеры в соответствующих разрешенных энергетических областях. Принципиально, что при этом энергия носителей тока сохраняется и нежелательного разогрева ТД не происходит.

### 3. Компоненты сквозных стационарных токов

Чтобы структуры обладали ОДС, их вольт-амперные характеристики (ВАХ) должны иметь вид кривой с максимумом, когда рост тока с увеличением  $V$  сменяется спадом в некотором диапазоне напряжений. Режим ОДС ТД реализуется при пропускных напряжениях  $V > 0$ . На рис. 3 приведены зонные диаграммы ПДП ТД для малого положительного смещения вблизи максимума ВАХ (а) и для большего смещения ближе к минимуму (b). Там же указаны компоненты протекающих токов.

Полный ток состоит из полезного тока, обеспечивающего ВАХ с максимумом и участком ОДС, и паразитного „избыточного“ тока, лишённого таких участков и демонстрирующего только рост с увеличением напряжения.

Полезный ток имеет две компоненты,  $j_{cv}$  и  $j_T$ , вызванные туннелированием электронов из энергетических полос заполненных состояний  $n^+$ -Si в полосы свободных состояний  $p^+$ -Si. Компонента  $j_{cv}$  создается переносом электронов из заполненной полосы  $c$ -зоны  $n^+$ -области в энергетическую щель  $v$ -зоны  $p^+$ -области при напряжениях, обеспечивающих перекрытие полосы и щели.  $j_T$  создается переносом электронов с участием примесных подзон хотя бы одной из кремниевых областей. Такие



**Рис. 3.** Вид зонных диаграмм ПДП ТД около пика ВАХ (а) и вблизи минимума ВАХ (b) с компонентами тока. На вставке для  $j_T$  отмечены уширение уровней примесей и составляющие примесного тока:  $j_{ca}$  ( $ca$ ),  $j_{da}$  ( $da$ ),  $j_{dv}$  ( $dv$ ).

подзоны формируются уширенными уровнями акцепторов и доноров. При сильном легировании полуширина достигает глубины залегания уровня, что часто трактуется как сужение запрещенной зоны [7], хотя рассматриваемые состояния не вполне эквивалентны состояниям  $v$ - $c$ -зоны. В токе  $j_T$  можно выделить три составляющих, помеченных на вставке к рис. 3. Они определяются транспортом электронов между донорной подзоной  $n^+$ -области и щелью  $v$ -зоны  $p^+$ -Si ( $j_{dv}$ ), из полосы  $c$ -зоны  $n^+$ -Si на незаполненные состояния акцепторной подзоны  $p^+$ -Si ( $j_{ca}$ ) и межподзонами донорно-акцепторными переходами ( $j_{da}$ ).

При вычислении компонент токов [5,6] должна учитываться туннельная прозрачность окисла ( $T_{ox}$ ) и прилегающих частей запрещенной зоны обеих кремниевых областей ( $T_s$ ). Так, для  $j_{cv}$  имеем

$$j_{cv} = \frac{4\pi q v_{\perp} m_{v\perp}}{h^3} \times \int_{E_{c\infty}^n}^{E_{v\infty}^p} \Delta f_{np}(E) dE \int_0^{E_{\perp,max}(E)} T_{ox}(E, E_{\perp}) T_s(E, E_{\perp}) dE_{\perp}. \quad (1)$$

Пределы по полной энергии частиц  $E$  помечены на рисунке, а предельное значение поперечной энергии  $E_{\perp}$  в  $p^+$ -области,  $E_{\perp,max}$ , выбирается так, чтобы тунелирование было разрешено:  $E_{\perp,max} = \min[(E_{v\infty}^p - E), (E - E_{c\infty}^n) m_{v\perp} / m_{c\perp}]$ . Через  $\Delta f_{np}$  обозначена разность функции Ферми кремниевых частей, через  $m_{\perp}$  — эффективная масса Si в плоскости структуры, а  $v_{\perp} = 3$  — вырождение. При расчете  $T_{ox}$  положены значения масс электрона и дырки в окисле  $0.42m_0$  и  $0.33m_0$ , величина разрыва  $c$ -зоны на границе Si/SiO<sub>2</sub> 3.15 эВ и ширина зоны окисла 8.9 эВ [6].

При вычислении токов с участием примесных подзон для простоты примем, что состояния примесей равномерно распределены по энергиям в диапазоне уширения, а время жизни на центре  $\tau_T$  равно  $10^{-10}$  с. Тогда составляющие тока  $j_T = j_{dv} + j_{ca} + j_{da}$  можно записать как

$$j_{dv|ca} = \frac{q}{\tau_T} \int c_{n|p}(E) \Delta f_{np}(E) T_{ox}(E) T_{s|p|sn,min}(E) dE, \quad (2)$$

$$j_{da} = \frac{q}{\tau_T} \int \frac{c_n(E) c_p(E)}{c_n(E) + c_p(E)} \Delta f_{np}(E) T_{ox}(E) dE, \quad (3)$$

где

$$c_{n|p} = \int \rho_{T0,n|p} T_{sn|sp}(z, E) dz$$

— двумерные эффективные плотности состояний ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ ),  $T_{sn|sp}$  — вероятности тунелирования внутри Si от места нахождения примеси  $z$  до ближайшей границы окисла, получаемые здесь, как и  $T_{ox}$ , с  $E_{\perp} = 0$ ; значение  $T_{sn|sp,min}$  отвечает наибольшему удалению от SiO<sub>2</sub>. Интегрирование по  $E$  проводится в пределах перекрытия энергий состояний в  $n^+$ - и  $p^+$ -Si для каждого механизма. Величина плотности примесей  $\rho_{T0,n|p}$  ( $\text{см}^{-3} \cdot \text{эВ}^{-1}$ ) зависит от  $z$  и  $E$ , но принимает всего два

значения: нуль или же  $N_{D/A}/\delta E$  (в диапазоне размытия примесного уровня).

В избыточный ток входят электронная компонента, протекающая между  $c$ -зонами кремниевых частей, и дырочная из  $v$ -зоны  $p^+$ -Si в  $v$ -зону  $n^+$ -Si (рис. 3), причем  $j_{cc} > j_{vv}$ . Тунелирование при этом происходит только через окисел. Компоненты  $j_{cc}$ ,  $j_{vv}$  вычисляются по формулам, аналогичным (1); например, для ббльшей из них,  $j_{cc}$ , имеем

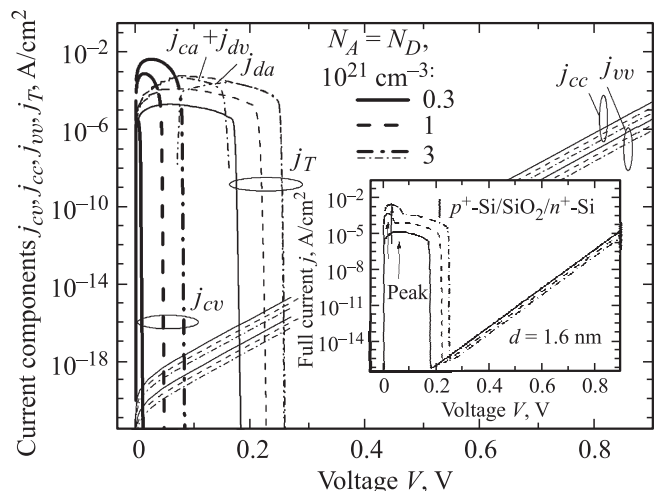
$$j_{cc} = \frac{4\pi q v_{\perp} m_{c\perp}}{h^3} \int_{E_{c\infty}^p}^{+\infty} \Delta f_{np}(E) dE \int_0^{E_{\perp,max}(E)} T_{ox}(E, E_{\perp}) dE_{\perp}. \quad (4)$$

Здесь  $E_{\perp,max} = \min[(E - E_{c\infty}^p), (E - E_{c\infty}^n)]$ , а вырождение  $v_{\perp} = 6$ . При высоких смещениях  $V$ , явно выходящих за рамки интересного в контексте ПДП ТД диапазона, дополнительно появится ток между  $v$ -зоной  $n^+$ -Si и  $c$ -зоной  $p^+$ -Si, не помеченный на рис. 3.

#### 4. Результаты расчета и обсуждение

На рис. 4 проведено количественное сопоставление компонент полезного и избыточного токов для структур  $p^+$ -Si/SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si с толщиной окисла 1.6 нм и тремя различными концентрациями легирующей примеси (при этом всегда  $N_A = N_D$ ). Представлены также рассчитанные вольт-амперные кривые ТД (см. вставку).

При сильном легировании ( $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ) максимум ВАХ связан с компонентой  $j_{cv}$  и приходится на перекрытие полосы занятых состояний  $c$ -зоны  $n^+$ -Si со щелью свободных состояний  $v$ -зоны  $p^+$ -Si. Когда эта компонента срывается, в некотором диапазоне напряжений  $V$  (до 0.2–0.3 В) на первый план выходит ток  $j_T$  с участием примесных подзон, абсолютные величины которого



**Рис. 4.** Рассчитанные компоненты сквозного туннельного тока в ПДП ТД  $p^+$ -Si/SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si при  $d = 1.6$  нм и различных концентрациях легирующих примесей. На вставке — ВАХ полного тока тех же структур.

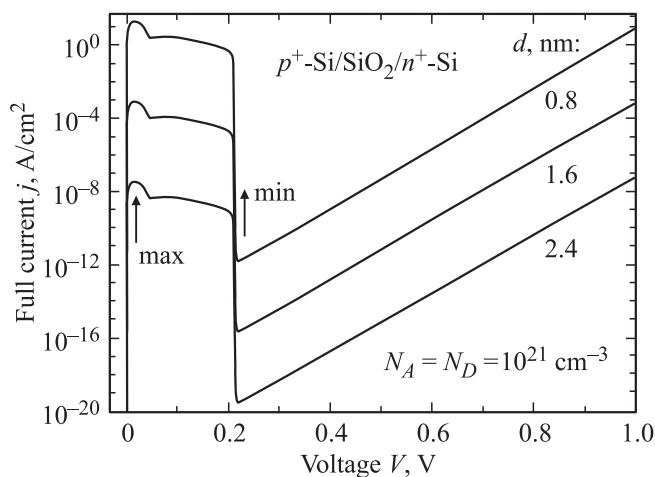


Рис. 5. ВАХ ПДП ТД с  $N_A = N_D = 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , рассчитанные для трех толщин  $d$  окисной прослойки.

могут варьироваться в зависимости от выбора  $\tau_T$ . При этом вблизи срыва  $j_{cv}$  существенный вклад в  $j_T$  дают составляющие  $j_{ca}$  и  $j_{dv}$ . При более высоких напряжениях основная роль принадлежит току  $j_{da}$ , отражающему туннелирование электронов между примесными подзонами заполненных донорных уровней  $n^+$ -Si в подзону свободных акцепторных состояний  $p^+$ -Si. На рис. 4 для одной концентрации ( $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ) составляющие  $j_{da}$  и  $j_{ca} + j_{dv}$  построены отдельно. Избыточные токи  $j_{cc}$  и  $j_{vv}$  в рабочем диапазоне полезного тока малы, но они экспоненциально нарастают с напряжением, достигая заметных значений при  $V > 0.6-0.7 \text{ В}$ .

При понижении концентрации легирующей примеси (ниже  $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) диапазон напряжений перекрытия  $c$ - и  $v$ -зон и величина тока  $j_{cv}$  уменьшаются. Однако в некотором диапазоне концентраций ( $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) максимум ВАХ может сохраняться благодаря току  $j_T$ .

На рис. 5 демонстрирует изменение ВАХ для диодов  $p^+$ -Si/SiO<sub>2</sub>/n<sup>+</sup>-Si с  $N_A = N_D = 10^{21} \text{ см}^{-3}$  по мере увеличения толщины SiO<sub>2</sub> до 2.4 нм. Окисная прослойка в ПДП ТД ослабляет как полезный, так и избыточный перенос электронов и дырок. Это естественным образом отражается снижением токов в максимуме ( $j_{\max}$ ) и в минимуме ( $j_{\min}$ ). Как показывает расчет, падение  $j_{\min}$  в определенном диапазоне толщин  $d$  существеннее, чем  $j_{\max}$ , благодаря чему растет отношение  $j_{\max}/j_{\min}$ . Получается, что варьированием уровня легирования полупроводниковых областей и толщины диэлектрика в ПДП ТД можно изменять величины полезного тока и соотношения  $j_{\max}/j_{\min}$  в широких пределах и выбирать для практического применения оптимальные параметры диода.

Дополнительно отметим, что если сравнивать не ПДП ТД структуры между собой, а такие структуры с ТД Эсаки, то из-за протекания в последнем нетуннельного „прыжкового“ тока по дефектам (подавление которого в ПДП системе упоминалось выше) избыточные токи мо-

гут заметно увеличиться. Поэтому, качественно, можно предвидеть выигрыш в отношении  $j_{\max}/j_{\min}$  для ПДП ТД вне связи с конкретной толщиной окисла  $d$ .

Несмотря на наличие идеи низкотемпературной технологии по созданию эпитаксиальных гетеропереходов  $p^+$ -Si/нано-SiO<sub>2</sub>, практическая реализация ПДП ТД с ОДС пока упирается в отсутствие финансовой и материально-технической поддержки.

## 5. Заключение

Проанализированы возможности управления свойствами туннельного ПДП-диода с отрицательным дифференциальным сопротивлением с целью улучшения его рабочих параметров при вариации толщины диэлектрика SiO<sub>2</sub> в диапазоне 0.8–2.4 нм и уровней разнотипного легирования обеих областей Si в диапазоне концентраций  $N_A = N_D = 3 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Показано, что диапазон изменения токов в максимуме и минимуме и соответственно их отношений весьма широк, причем во всех случаях должен наблюдаться выраженный сегмент ОДС. Очевидно, что у ТД Эсаки возможностей для варьирования гораздо меньше. Кроме того, условия функционирования ПДП-диода улучшаются за счет существенного снижения напряженности электрического поля в обеих кремниевых областях и передислокации его на слой SiO<sub>2</sub>. Имеет место подавление диссипативных компонент тока: диффузионной и прыжковой. Использование кварцевого (нано-SiO<sub>2</sub>) резонатора с присущей ему высокой добротностью [8] должно существенно поднять качество генерируемого высокочастотного сигнала, его стабильность, временную и температурную, а также расширить диапазон рабочих частот до терагерцового за счет нанометровой толщины окисной прослойки.

## Список литературы

- [1] Y.-C. Yeo, T.-J. King, C. Hu. IEEE Trans. Electron Dev., ED-50 (4), 1027 (2003).
- [2] J.C. Ranuárez, M.J. Deen, C.-H. Chen. Microelectron. Reliab., 46 (12), 1939 (2006).
- [3] Г.Г. Карева, М.И. Векслер. ФТП, 47 (8) 1087 (2013).
- [4] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. (М., Мир, 1984) кн. 2, гл. 9.
- [5] A. Schenk. Advanced physical models for silicon device simulation (Wien, Springer, 1998) Ch. 5.
- [6] М.И. Векслер, С.Э. Тягинов, Ю.Ю. Илларионов, Y.K. Sing, A.D. Shenp, B.B. Федоров, Д.В. Исаков. ФТП, 47 (5), 675 (2013).
- [7] D. Klaassen, J. Slotboom, H. de Graaff. Sol. St. Electron., 35 (2), 125 (1992).
- [8] В.Г. Андросова, В.Н. Банков, А.Н. Дикиджи, В.А. Ильичев, А.Е. Караульник, П.Г. Поздняков, С.В. Рахманинов, И.М. Федотов, В.Н. Христофоров. Справочник по кварцевым резонаторам, под ред. П.Г. Позднякова (М., Связь, 1978).

Редактор Т.А. Полянская

## **A $p^+$ -Si/nano-SiO<sub>2</sub>/ $n^+$ -Si capacitor-based tunnel diode with negative differential resistance and quartz resonator**

*G.G. Kareva\**, *M.I. Vexler*<sup>+</sup>

\* Saint Petersburg State University,  
Physical Faculty,  
198504 St. Petersburg, Stariy Petergof, Russia

<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** In order to demonstrate extending functionality of the simplest MOS-capacitor, the structure based on a  $p^+$ -Si/nano-SiO<sub>2</sub> heterojunction with strongly degenerate  $n^+$ -Si instead of a metal, has been considered. As a result, the tunnel diode with negative differential resistance and quartz resonator is obtained. Its electrical characteristics are superior to those of the corresponding Esaki diode and controlled not only by the Si doping level, but also by the SiO<sub>2</sub> thickness.