Модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая возможное влияние космического излучения

Артем Н. Волков, *ООО «Научно-производственное объединение Программные комплексы реального времени», Москва, Россия, e-mail: artem.n.volkov@yandex.ru*

Артем Н. Волков

Резюме. Цель. *В рамках данной работы ставились следующие цели: исследование физических механизмов деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов, вызванной обрывом Si-H связей; исследование возможности влияния космического излучения на надежность наноразмерных полевых транзисторов; разработка модели прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения. Для выполнения поставленных целей были проанализированы: современные модели прогнозирования надежности полевых транзисторов; данные о составе, интенсивности потока космического излучения в зависимости от энергии.* **Результаты и выводы.** *В результате работы показано, что наиболее актуальной физической моделью прогнозирования надежности является модель Браве, которая учитывает следующие механизмы деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов: механизм единичного возбуждения или воздействия (Single Vibration Excitation – SVE), когда обрыв Si-H связи инициируется одним носителем, обладающим достаточной энергией; механизм электрон – электронного рассеяния (Electron – Electron Scattering – EES), когда обрыв связи инициируется носителем, получившим часть энергии от другого носителя, в результате акта ударной ионизации и имеющим после этого достаточно энергии для обрыва связи; механизм мульти-вибрационного возбуждения или воздействия (Multi Vibration Excitation – MVE), когда обрыв Si-H связи инициируется последовательной бомбардировкой связи, носителями, обладающими недостаточной для обрыва связи энергией. Показано, что протоны космического излучения, обладающие большой начальной энергией, могут пройти сквозь структуру полевого транзистора, теряя при этом часть своей начальной энергии на ионизационных потерях, и достичь границы раздела Si/SiO_2. При достижении границы раздела протоны могут обладать энергией, достаточной для инициации процесса диссоциации Si-H связей по двум механизмам: механизм единичного возбуждения Si-H связи под воздействием протона (Single Vibration Excitation – SVEp) – одиночный протон, обладающий достаточной для обрыва связи энергией, сталкивается с атомом водорода и инициирует процесс диссоциации Si-H связи; механизм ударной ионизации – по аналогии с описанным в модели Браве электрон – электронным рассеянием, в данном случае может иметь место протон – электронное рассеяние (Proton-Electron Scattering – PES). На основе модели Браве разработана модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая возможное влияние космического излучения и позволяющая дать более точный прогноз надежности электронных устройств на их основе. Данная работа отражает современное представление о прогнозировании надежности наноразмерных полевых транзисторах, показывает основные физические механизмы деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов. В данной работе показано, что модели прогнозирования надежности, разработанные для полевых транзисторов с длинным каналом, не подходят для современных наноразмерных устройств, в виду различия механизмов деградации. В рамках данной работы было показано, что существует вероятность влияния космического излучения на деградацию, разработана модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая данное влияние.*

Ключевые слова: *надежность, деградация приборных характеристик, физические механизмы деградации, наноразмерные полевые транзисторы, космическое излучение, модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов.*

Формат цитирования*: Волков А.Н. Модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая возможное влияние космического излучения // Надежность. 2016. №3. С. 18-22. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-18-22*

Введение

Появление современных технологий, с каждым разом уменьшающих физические размеры и улучшающих приборные характеристики полевых транзисторов, привело к созданию современных наноразмерных электронных устройств. Скачкообразный переход от устройств микронных размеров, которые были предметом исследования в течение нескольких десятилетий, к устройствам

с нано размерами породил необходимость новых исследований в области физических механизмов деградации и отказов современных электронных устройств, основанных на наноразмерных полевых транзисторах. Модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик, разработанные и успешно применявшиеся в электронных устройствах микронных размеров, не могут в полном объеме дать оценку надежности современных наноразмерных устройств ввиду наличия у последних других физических механизмов деградации, являющейся причиной наступления параметрического отказа и сокращения надежности устройств.

Применение современных наноразмерных полевых транзисторов в аппаратуре космического назначения требует учитывать при прогнозировании надежности возможное влияние космического излучения, так как данное влияние становится все более значимым в электронных устройствах на их основе.

На сегодняшний день существующие физические модели, описывающие механизмы деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов и позволяющие прогнозировать их надежность, не учитывают возможное влияние на деградацию приборных характеристик космического излучения и не могут в полном объеме дать оценку надежности электронных устройств космического назначения. Таким образом, разработка модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения, является актуальной задачей.

В рамках данной работы ставилась задача построения физической модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения.

Физические модели прогнозирования надежности

На сегодняшний день существует большое количество эмпирических и полуэмпирических моделей прогнозирования надежности металл-оксид-полупроводник транзисторов (МОПТ), описывающих деградацию их приборных характеристик, вызванную обрывом Si-H связей на границе раздела Si/SiO_2 [1, 2]. Большинство этих моделей основаны на концепции «удачливых» электронов («lucky electron model» в англоязычной литературе). Данная концепция хорошо описывает механизм обрыва Si-H связей в транзисторах с длинным каналом и электронных устройствах на их основе. Для этих устройств характерны высокие напряжение питания и, как следствие, высокое значение напряженности латерального электрического поля в канале. Данное электрическое поле способно разгонять электроны в канале, делая их «горячими» («hot electron» в англоязычной литературе), т.е. имеющими достаточную энергию для инициации процесса диссоциации Si-H связи. Большинство электронов, разогнанных электрическим полем в канале полевого транзистора, продолжает свое движение в сторону стока, но некоторые из них («удачливые») отклоняются от траектории движения и достигают поверхности раздела Si/SiO_2, где инициируют обрыв Si-H связей или проникают в окисел, образуя, таким образом, поверхностные или пространственные ловушки. Именно этот физический механизм лег в основу концепции «удачливых» электронов и, соответственно, моделей прогнозирования надежности, основанных на данной концепции.

В современных наноразмерных полевых транзисторах, имеющих более низкое напряжение питания и, как следствие, более низкое значение напряженности латерального электрического поля в канале, исходя из концепции «удачливых» электронов, деградация приборных характеристик, вызванная обрывом Si-H связей, должна быть сведена к минимуму или отсутствовать вообще. Однако не смотря на это, данный вид деградации в современных наноразмерных полевых транзисторах и электронных устройствах на их основе продолжает наблюдаться и даже становится более актуальной проблемой по сравнению с устройствами микронных размеров, что говорит о наличии в наноразмерных полевых транзисторах других физических механизмов, вызывающих обрыв Si-H связей и, как следствие, деградацию приборных характеристик [3].

Таким образом, концепция «удачливых» электронов и модели прогнозирования надежности на ее основе не подходят для прогнозирования надежности и описания деградации приборных характеристик современных наноразмерных полевых транзисторов и электронных устройств на их основе. Следовательно, необходимы новые модели, учитывающие особенности наноразмерных полевых транзисторов и физических процессов, лежащих в основе деградации их приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей.

В работе [3] автор приводит обзор современных физических моделей прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей, для наноразмерных полевых транзисторов. Особенностями данных моделей является то, что они описывают те новые физические механизмы, присущие наноразмерным полевым транзисторам, которые отсутствовали в концепции «удачливых» электронов, а именно:

– связь может разрываться под воздействием одиночного носителя с высокой энергией;

– диссоциация связи может возникать вследствие последовательной бомбардировки связи несколькими носителями с меньшей энергией;

– в наноразмерных полевых транзисторах электрон-электронное рассеяние играет доминирующую роль в процессе обрыва Si-H связей;

– в наноразмерных полевых транзисторах начиная с топологической нормы 180 нм и ниже, управляющей силой деградации является энергетический вклад носителей заряда в канале, а не электрическое поле.

Наиболее успешной физической моделью является модель Браве (Braviax), так как она не требует решения кинетического уравнения Больцмана, для определения функции распределения электронов по энергиям, а также объединяет в себе подходы, разработанные в других моделях, и предполагает, что деградация, вызванная обрывом Si-H связей, может развиваться по трем независимым механизмам:

- механизм единичного возбуждения или воздействия (Single Vibration Excitation – SVE), когда обрыв Si-H связи инициируется одним носителем, обладающим достаточной энергией. Данный механизм хорошо описан моделью «удачливых» электронов;

- механизм электрон-электронного рассеяния (Electron – Electron Scattering – EES), когда обрыв связи инициируется носителем, получившим часть энергии от другого носителя, в результате акта ударной ионизации и имеющим после этого достаточно энергии для обрыва связи. Данный механизм хорошо описан в рамках энергетически управляемой парадигмы [3];

- механизм мульти-вибрационного возбуждения или воздействия (Multi Vibration Excitation – MVE), когда обрыв Si-H связи инициируется последовательной бомбардировкой связи носителями, обладающими недостаточной для обрыва связи энергией. Данный механизм был предложен и хорошо описывается моделью Хесса (Hess), в основе которой лежит упрощенная модель гармонического осциллятора [3].

Объединяя, таким образом, три данных механизма обрыва Si-H связи, модель прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик Браве описывается следующим уравнением:

$$R_{it} = \frac{1}{\tau} = C_1 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}}\right)^{m} + C_2 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W}\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}}\right)^{m} + C_3 \cdot V_{ds}^{a_3/2} \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W}\right) \cdot \exp\left(\frac{-E_{emi}}{k_B T}\right) \quad (1)$$

где R_{it} – интенсивность образования поверхностных состояний в результате обрыва Si-H связей; τ – срок службы (время до наступления параметрического или критического отказа); C_1 (SVE), C_2 (EES) C_3 (MVE), a_1, a_2, a_3, m – эмпирические параметры, получаемые из результатов ускоренных испытаний; E_{emi} = 0,26 эВ – энергия эмиссии водорода с последнего связующего энергетического уровня (определена в рамках модели Браве [3]); k_B – постоянная Больцмана; T – температура; I_{ds} – ток стока; I_{bs} – ток подложки; V_{ds} –напряжение на стоке; W – ширина канала;

Несмотря на то, что данная модель хорошо описывает механизмы образования поверхностных состояний с физической точки зрения и имеет огромное преимущество перед устаревшей, но при этом до сих пор применяемой в качестве индустриальной, концепцией «удачливых» электронов, модель Браве можно применять для описания деградации приборных характеристик только в устройствах, не подвергающихся внешнему воздействию, способному повлиять на процесс образования поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO_2. В качестве такого внешнего воздействия может выступать ионизирующее излучение космических лучей, способное оказывать влияние на надежность и деградацию приборных характеристик современных наноразмерных полевых транзисторов аппаратуры космического назначения.

Моделирование влияния космического излучения на надежность МОПТ

Согласно работам [4, 5] космическое излучение более чем на 80 % состоит из ядер протонов больших энергий (10^8 – 10^{20} эВ), а интенсивность потока космического излучения в зависимости от энергии частиц описывается формулой:

$$I_N(E) \approx 1{,}8 \times 10^4 \left(E/1\,ГэВ\right)^{-\alpha} \quad (2)$$

где $\alpha\,(\equiv \gamma + 1) = 2{,}7$; E – энергия частиц.

Можно предположить, что протоны космического излучения, обладающие большой начальной энергией, могут пройти сквозь структуру полевого транзистора, теряя при этом часть своей начальной энергии на ионизационных потерях, и достичь границы раздела Si/SiO_2. При достижении границы раздела протоны могут обладать энергией, достаточной для инициации процесса диссоциации Si-H связей по двум механизмам:

- механизм единичного возбуждения Si-H связи под воздействием протона (Single Vibration Excitation – SVE_p) – одиночный протон, обладающий достаточной для обрыва связи энергией, сталкивается с атомом водорода и инициирует процесс диссоциации Si-H связи;

- механизм ударной ионизации – по аналогии с описанным в модели Браве электрон-электронным рассеянием в данном случае может иметь место протон-электронное рассеяние (Proton-Electron Scattering – PES). Протон, обладающий энергией, не достаточной для обрыва Si-H связи, может передать необходимое количество энергии электрону канала, который, в свою очередь, сможет инициировать процесс диссоциации Si-H связи.

Согласно работам [3, 6] интенсивность образования поверхностных состояний R_{it}, как обратная функция от времени до наступления параметрического отказа $R_{it} = \frac{1}{\tau}$, являющаяся основой модели Браве, пропорциональна интегралу произведения двух функций:

$$R_{it} \propto \int f(E) \cdot S(E) dE \quad (3)$$

где $f(E)$ – функция распределения по энергиям, $S(E)$ – сечение реакции.

Таким образом, в случае расчета интенсивности образования поверхностных состояний из-за воздействия протонов космического излучения необходимо определить функцию распределения протонов по энергиям и сечение ядерной реакции взаимодействия протонов

космического излучения с атомами водорода в окисле и электронами канала.

Интенсивность потока космического излучения или дифференциальный поток есть не что иное, как функция распределения протонов космического излучения по энергиям, которая описывается уравнением (2). Таким образом, необходимо определить сечение ядерной реакции.

Согласно [7] сечение ядерной реакции можно определить как:

$$S(E) = \frac{dn}{jN} \quad (4)$$

где dn – число заданных реакций, j – плотность потока налетающих на мишень частиц, N – количество частиц мишени.

Согласно работе [8] интенсивность излучения определяется как:

$$I = \Phi \cdot E \quad (5)$$

где I – интенсивность потока, Φ – плотность потока, E – энергия.

Таким образом, необходимую для расчета эффективного сечения плотность потока протонов космического излучения можно определить, разделив уравнение (2), описывающее интенсивность потока космического излучения, на энергию:

$$j = I_N(E)/E \approx \frac{1{,}8 \cdot 10^4 \left(E\right)^{-2,7}}{E} \approx 1{,}8 \cdot 10^4 \left(E\right)^{-3,7} \quad (6)$$

Обозначив сечение ядерной реакции взаимодействия протонов космического излучения с атомами водорода в окисле через функцию $S_{SVEp}(E)$, принимая, что число атомов водорода в окисле находится как n – концентрация атомов водорода в окисле (в м$^{-3}$), L, W, T_{ox} – длина канала, ширина канала, толщина окисла соответственно, а число заданных реакций dn определяется как число образовавшихся поверхностных состояний $dN_{it}(E)$, получаем следующую формулу для расчета эффективного ядерного сечения реакции взаимодействия протонов космического излучения с атомами водорода в окисле:

$$S_{SVEp}\left(E\right) = \frac{dN_{it}(E)}{1{,}8 \cdot 10^4 \cdot \left(E\right)^{-3,7} \cdot n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} \quad (7)$$

Объединяя уравнение (2), описывающее функцию распределения протонов по энергиям, и уравнение (7), описывающее функцию зависимости эффективного сечения от энергии, получим выражение для интенсивности образования поверхностных состояний в случае SVEp механизма диссоциации Si-H связи:

$$R_{itSVEp} \propto \int 1{,}8 \times 10^4 \left(E\right)^{-2,7} \cdot \frac{dN_{it}(E)}{1{,}8 \cdot 10^4 \cdot \left(E\right)^{-3,7} \cdot n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} dE. \quad (8)$$

Вынося константы за знак интеграла, подставив все известные величины и решив интеграл, получаем:

$$R_{itSVEp} = C_4 \cdot \frac{dN_{it}(E)}{n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} \cdot \frac{E^2}{2} \quad (9)$$

где C_4 – коэффициент пропорциональности, получаемый эмпирически; $dN_{it}(E)$ – количество образовавшихся после взаимодействия протонов с атомами водорода поверхностных состояний, зависящее от начальной энергии протонов и интенсивности их потока; n – концентрация водорода в окисле; L – длина канала; W – ширина канала; T_{ox} – толщина окисла; E – энергия протонов космического излучения.

Для случая протон-электронного рассеяния, обозначив сечение ядерной реакции взаимодействия протонов космического излучения с электронами в канале через функцию $S_{PES}(E)$, полагая, что скорость электронов в канале пренебрежительно мала по сравнению со скоростью протонов космического излучения, считая их равномерно распределенными в канале с концентрацией, определяющейся как $N = \frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W$, где I_{sd} – ток, протекающий через канал от истока к стоку, e – заряд электрона, L – длина канала, W – ширина канала, получаем следующую формулу для расчета эффективного сечения ядерной реакции взаимодействия протонов космического излучения с электронами канала:

$$S_{PES}(E) = \frac{dN_{it}(E)}{1{,}8 \cdot 10^4 \cdot (E)^{-3,7} \cdot \frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W}. \quad (10)$$

По аналогии с взаимодействием протонов космического излучения с атомами водорода в окисле получаем для протон-электронного рассеяния выражение интенсивности образования поверхностных состояний:

$$R_{itPES} = C_5 \cdot \frac{dN_{it}(E)}{\frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W} \cdot \frac{E^2}{2}, \quad (11)$$

где C_5 – коэффициент пропорциональности, получаемый эмпирически;

По аналогии с моделью Браве, в которой все механизмы деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связи, являются независимыми, считая вклады в деградацию от механизмов, описанных уравнениями (9) и (11) также независимыми, объединим уравнение модели Браве (1) и уравнения (9), (11) и получим выражение расширенной модели Браве, физической модели прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения:

$$R_{it} = \frac{1}{\tau} = \left[\begin{array}{l} C_1 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}}\right)^{m} + C_2 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W}\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}}\right)^{m} + \\ + C_3 \cdot V_{ds}^{a_3/2} \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W}\right)^{a_3} \cdot \exp\left(\frac{-E_{emi}}{k_B T}\right) \end{array} \right] +$$

$$+ \left\langle C_4 \cdot \frac{dN_{it1}(E)}{n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} \cdot \frac{E_1^{\,2}}{2} + C_5 \cdot \frac{dN_{it2}(E)}{\frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W} \cdot \frac{E_2^{\,2}}{2} \right\rangle, \quad (12)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – коэффициенты пропорциональности, получаемые эмпирически, для SVE, EES, MVE, SVE_p и PES механизмов образования поверхностных состояний соответственно; a_1, a_2, a_3, m – эмпирические параметры, получаемые из результатов ускоренных испытаний (были определены в рамках модели Браве [3], однако могут требовать уточнения для различных типов устройств); E_{emi} = 0,26 эВ – энергия эмиссии водорода с последнего связующего энергетического уровня (определена в рамках модели Браве [3]); k_B – постоянная Больцмана; T – температура; I_{ds} – ток стока; I_{sd} – ток протекающий в канале от истока к стоку; I_{bs} – ток подложки; V_{ds} –напряжение на стоке; L – длина канала; W – ширина канала; T_{ox} – толщина окисла; n – концентрация водорода в окисле; e – заряд электрона; $dN_{it1}(E)$ – количество образовавшихся поверхностных состояний по SVE_p механизму, зависящее от начальной энергии протонов и интенсивности их потока, определяется по результатам ускоренных испытаний; dN_{it2} – количество образовавшихся поверхностных состояний по PES механизму, зависящее от начальной энергии протонов и интенсивности их потока, определяется по результатам ускоренных испытаний; E_1 – начальная энергия протонов космического излучения, способных достичь границы раздела Si/SiO_2 с конечной энергией, достаточной для инициации процесса образования поверхностных состояний по SVE_p механизму, определяется конструктивными особенностями устройств; E_2 – начальная энергия протонов космического излучения, способных достичь границы раздела Si/SiO_2 с конечной энергией, достаточной для инициации процесса образования поверхностных состояний по PES механизму, определяется конструктивными особенностями устройств.

Операнд уравнения (12), заключенный в квадратные скобки, непосредственно относится к модели, разработанной Браве и соавторами [3], тогда как операнд, заключенный в угловые скобки, относится к разработанному в рамках данной работы дополнению к модели Браве, позволяющему учитывать возможное влияние космического излучения на деградацию приборных характеристик, вызванную обрывом Si-H связей.

Заключение

В рамках данной работы было показано, что современные наноразмерные полевые транзисторы и электронные устройства на их основе по-прежнему подвержены деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей, несмотря на снижение напряжения питания и значения латерального электрического поля в канале.

Эмпирические и полуэмпирические модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик, основанные на устаревшей, но по-прежнему применяющейся концепции «удачливых» электронов, не могут в полном объеме дать оценку надежности современных наноразмерных полевых транзисторов и электронных устройств на их основе.

Современные физические модели, такие как, например, модель Браве, позволят описать физические механизмы деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей, присущие современным наноразмерным полевым транзисторам и способны дать более точный прогноз надежности электронных устройств на их основе.

Разработанная в рамках данной работы модель основана на физической модели Браве. Данная модель расширяет модель Браве и позволяет учитывать возможное влияние космического излучения на деградацию приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов и, как следствие, позволяет дать расширенный прогноз надежности электронных устройств на их основе, потенциально пригодных для использования в аппаратуре космического назначения.

Библиографический список

1. Prabhakar M. Characterization and modeling of hot carrier degradation in sub-micron n-MOSFETs/ M. Prabhakar// Master's thesis, Nashville, Tennessee. – 2002. – P. 60.

2. White M. Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation/ M. White, J.B. Bernstein// California Institute of Technology. – 2008. – P. 210.

3. Grasser T. Hot Carrier Degradation in Semiconductor Devices/ T. Grasser// Springer International Publishing Switzerland, 2015. – P. 517.

4. Клапдор-Клайнгротхаус Г.В. Астрофизика элементарных частиц/ Г.В. Клапдор-Клайнгротхаус, К. Цюбер; под ред. В.А. Беднякова. – М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 2000. – 496 с.

5. Review of particle physics, Pt. 24: Cosmic Rays/ K. Nakamura et al.// J. Phys. – Vol. 37. – pp. 269 – 277.

6. Rauch S.E. The energy-driven paradigm of n-MOSFET hot carrier effects/ S.E. Rauch, G.L. Rosa// IEEE Transactions on Electron Devices and Materials Reliability. – 2005. – Vol. 5. – №4. – pp. 701 – 705.

7. Широков Ю.М.Ядерная физика/ Ю.М. Широков, Н.П. Юдин. – М.: Наука, 1980. – 728 с.

8. Лощаков И.И. Введение в дозиметрию и защита от ионизирующих излучений: учебной пособие/ И.И. Лощаков. – Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет, 2008. – 145 с.

Сведения об авторах

Артем Н. Волков, разработчик текстовой документации 2 категории, ООО «Научно-производственное объединение Программные комплексы реального времени».

124683, Россия, Москва, Зеленоград, корпус 1546, кв. 113, тел.: +7 (905) 756 – 97 – 27, e-mail: artem.n.volkov@yandex.ru

Поступила 17.02.2016