

Чувствительность распределения потенциала в канале кремниевых GAA нанотранзисторов к аномальному поведению зернистости металлического затвора

Н.В. Масальский¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, volkov@niisi.ras.ru

Аннотация. Обсуждается влияние аномальной зернистости металлического затвора кремниевого полевого GAA нанотранзистора с цилиндрической геометрией на распределение потенциала в его рабочей области. На основе аналитического решения 2D уравнения Пуассона разработана аналитическая модель для анализа чувствительности распределения потенциала кремниевых полевых GAA нанотранзисторов к аномальному поведению зернистости металлического затвора. Количественно проанализированы вариации распределения потенциала в транзисторах с короткой и тонкой рабочей областью с длиной от 25 до 11 нм. Показана зависимость возмущения потенциала от расположения аномальной зернистости на затворе. Установлена линейная зависимость амплитуды возмущения от величины скачка работы выхода. Разработана математическая модель флуктуации распределения потенциала, включающая вариации неравномерности границ аномальной области зернистости. Неравномерность границ аномальной области вносит дополнительный вклад в трансформацию потенциала. При примерно одинаковых деформациях границ вклад данного механизма не существенен. При значительной асимметрии границ вклад может превышать 10% от возмущения, сгенерированного идеальным кольцом.

Ключевые слова: кремниевый цилиндрический нанотранзистор с полностью охватывающим затвором, аномальная зернистость металлического затвора, распределение потенциала, уравнение Пуассона, моделирование

1. Введение

Одним из важных источников вариативности электро-физических характеристик кремниевых полевых all around gate (GAA) нанотранзисторов является зернистость металлического затвора (ЗМЗ) [1], возникающая в результате технологических процессов осаждения и литографических процессов [1-3]. В общем случае независимо от материала затвора (или он создан на основе поликристаллического кремния или на металлической основе) затвор состоит из множества хаотически ориентированных зерен с различной конфигурацией [1, 4, 5]. Это приводит к изменению работы выхода затвора ϕ_M . В данной работе в качестве объекта исследования выбран широко используемый нитрид-титановый металлический затвор, который характеризуется хорошей совместимостью с оксидом кремния и низкой емкостью [6]. Нивелировать влияние зернистости металлического затвора (ЗМЗ) можно технологическими приемами, снижающими и размер зерна и неравномерность кромки затвора. Использование таких подходов для получения затворов с мелкими зернами может приводить к их

аномальному (отличному от равномерного) распределению. Предельным случаем является распределение зерен с одинаковой работой выхода в виде ленты, полностью охватывающей затвор, наблюдаемое экспериментально с помощью KPFM [7]. Следует отметить, что мы не анализируем природу распределения зерен по поверхности затвора и их кластеризацию в определенные домены.

На рис. 1 показана схема кремниевого полевого GAA нанотранзистора с цилиндрической геометрией и его металлического затвора с аномальной зернистостью, на котором изучается влияние механизма аномальной ЗМЗ.

Распределение потенциала - ключевая характеристика любого кремниевого полевого транзистора, включая и GAA архитектуру. В настоящей работе численно исследуется чувствительность распределения потенциала к аномальному поведению зернистости металлического затвора в виде полностью охватывающей области (кольца) и неравномерности ее границы. Исходя из современных технологических норм в настоящей работе диапазон длин затворов (L_g) прототипов составляет от 11 до 25 нм и ширины кольца, соиз-

$$\phi_s(z) = \frac{1}{\sinh(\frac{L_g}{l})} [\Phi_1(z) \sinh(\frac{L_g - z}{l}) +$$

$$+ \Phi_2(z) \sinh(\frac{z}{l})] - A(z)$$

(3)

$$A(z) = A_0(z) - U'_{gs}(z),$$

$$\Phi_1(z) = A_0(z) + U_{bi} - U'_{gs}(z),$$

$$\Phi_2(z) = A_0(z) + U_{bi} + U_{ds} - U'_{gs}(z),$$

$$A_0(z) = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \left(\frac{1 - C((l/L_g)^2 - 1)}{4C} \right) R^2 -$$

$$- U'_{gs}(z)$$

$$l = \frac{R}{2} \sqrt{2 \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} \ln(1 + \frac{t_{ox}}{R}) + 1} \quad \text{— характеристическая длина, } U_{ds} \text{ — напряжение на стоке, } U_{bi} \text{ — контактная разность потенциалов.}$$

Такой подход упрощает определение оценки чувствительности распределения потенциала из-за флуктуации топологии затвора. В этом случае можно воспользоваться следующим выражением [11]:

$$\delta\phi_s = \frac{1}{\sinh(\frac{L_g}{l})} [\delta\Phi_1 \sinh(\frac{L_g - z}{l}) +$$

$$+ \delta\Phi_2 \sinh(\frac{z}{l})] - \delta A$$

(4)

Полученные соотношения (3) и (4) будут инвариантны относительно значения длины затвора, поскольку мы подразумеваем, что отношение L_g/l практически постоянно в диапазоне исследуемых длин затворов и составляет чуть меньше 10, чтобы выполнить условие подавления коротко-канальных эффектов.

3. Результаты аналитического моделирования

Рассмотрим поведение поверхностного потенциала ϕ_s при наличии узкой ленты (полоски), которая полностью охватывает затвор, разной ширины и разных положениях. С точки зрения поведения классического потенциала можно выделить условно пять областей, что иллюстрируется на рис. 2.

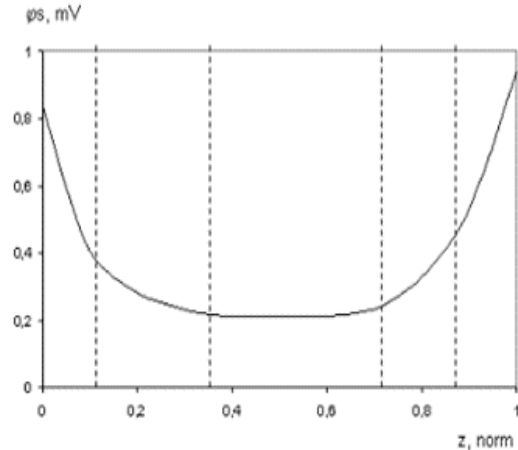


Рис. 2. Распределение потенциала ϕ_s в случае фМ – const при $U_{ds} = 0.1$ В

Две быстро меняющиеся, которые расположены рядом со стоком и истоком, две переходные и самую протяженную, в которой потенциал практически не меняется. На рис. 3 кольцо шириной равной характеристической длине располагается практически рядом со стоком, истоком, по середине затвора и в серединах переходных областей от истока и стока.

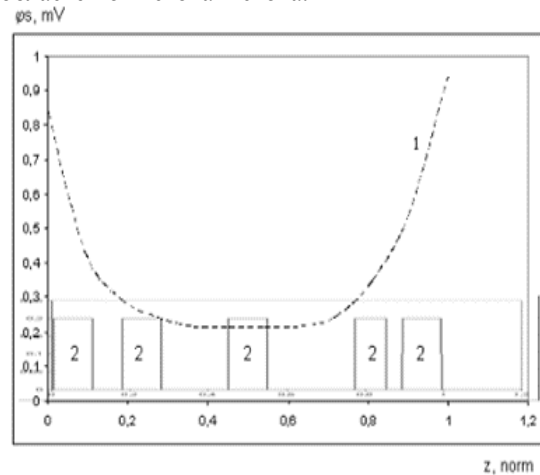


Рис. 3. Расположение скачков работы выхода по длине затвора, где 1 (пунктир) – идеализированное распределение потенциала, 2 – скачки работы выхода.

Скачок (амплитуда) возмущения $\Delta\phi_M$ ограничена разностью работ выхода из зерен разной ориентации. Следует отметить, что такая схема расположения (по пяти зонам) применима при условии $l \approx G_s$, G_s где размер зерна.

На рис. 4 приведены результаты расчета распределения потенциала в разных областях.

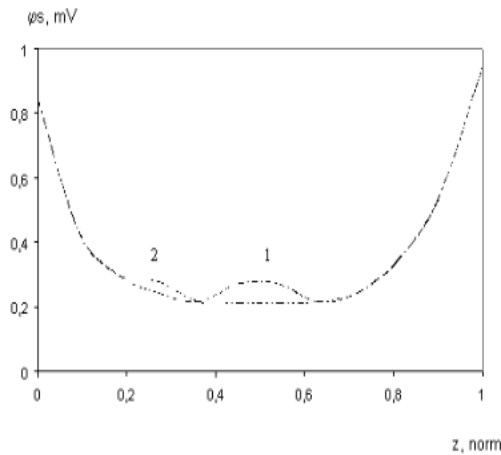


Рис. 4. Распределение потенциала в случае аномального поведения работы выхода

Из приведенных результатов хорошо видно, что отклонение потенциала имеет свои особенности. В областях быстро меняющегося потенциала (с высоким градиентом) их влияние незаметно, в переходных областях - чуть-чуть, и заметное изменение формы распределения потенциала происходит в области, где градиент потенциала близок к 0. Отметим, что для электрофизических характеристик транзистора значение кривизны важно, т. к. оно влияет на ключевые параметры пороговое напряжение и подпороговый наклон.

На рис. 5 приведено распределение потенциала для двух случаев ширины кольца.

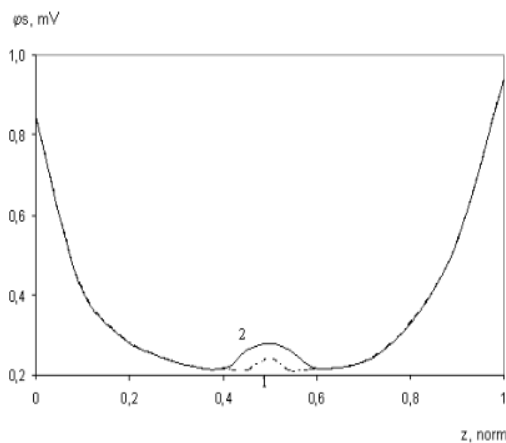


Рис. 5. Распределение потенциала для разной ширины кольца, где 1 - $l/2$, 2 - l

Данную зависимость можно обобщить следующим образом. Амплитуда возмущения потенциала $\Delta\phi_s$ будет пропорциональна ширине кольца. Принимая во внимание, что минимальная ширина кольца ограничена минимальным размером зерна, то для прототипов с $L_g < 20$ нм ширина кольца будет больше чем l . Например, для прототипов с ультра короткой и тонкой РО

(случай $L_g = 11$ нм) минимальная ширина кольца будет составлять примерно $2l$ и конфигурация с 5-ю областями трансформируется в конфигурацию с 3-мя. При этом сохраняется характер зависимости амплитуды возмущения потенциала от ширины и местоположения кольца.

В общем случае амплитуда возмущения потенциала зависит от отношения размера области с отличным значением работы выхода и общей длина затвора L_g . С ростом этого отношения амплитуда возмущения потенциала пропорционально увеличивается. При увеличении ширины кольца линейный характер зависимости сохраняется. Данные зависимости приведены ниже на рис. 6. Следует отметить, что такое масштабирование приведет к замедлению роста амплитуды возмущения потенциала, и в конечном итоге он перестает расти, когда ширина кольца приблизится к половине длины затвора.

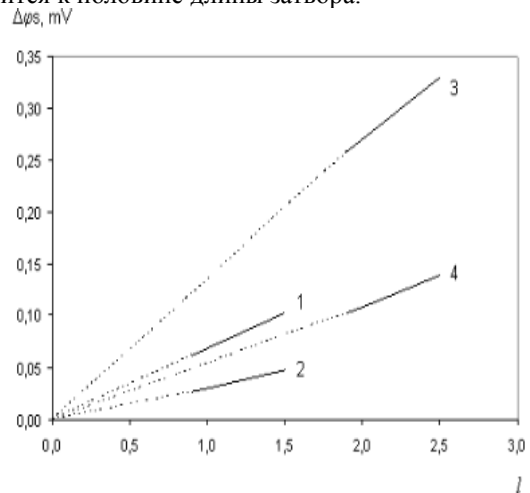


Рис. 6. Зависимость амплитуды возмущения потенциала $\Delta\phi_s$ от ширины кольца в единицах l , для разных зон и L_g , где 1,2 - $L_g = 25$ нм, 3,4 - $L_g = 11$ нм, 1,3 - для центральной зоны, 2,4 - для промежуточной

Отметим, что продолжения приведенных зависимостей проходят через начало координат. А их наклон кроме перечисленных факторов зависит также и от значения $\Delta\phi_M$. Так, с ростом $\Delta\phi_M$ крутизна всех зависимостей $\Delta\phi_s(l)$ пропорционально увеличивается, что иллюстрируется рис. 7.

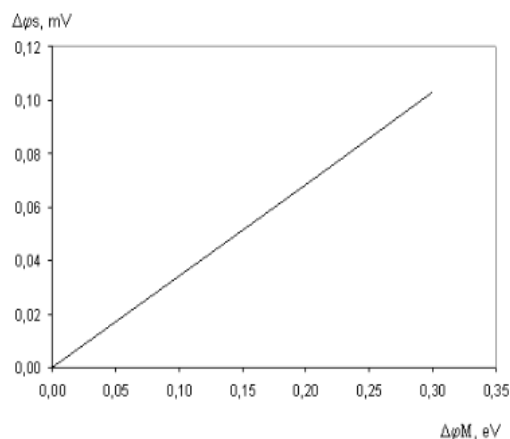


Рис. 7. Зависимость амплитуды возмущения потенциала $\Delta\phi_s$ ($\Delta\phi_M$)

Наклон этой зависимости будет общим для всех размеров РО в рассматриваемом диапазоне значений при условии, что выполнено условия подавления ККЭ.

Рассмотрим более сложный случай, когда кольцо не перпендикулярно аксиальной оси z , расположено под углом к ней, что иллюстрируется рис. 8.

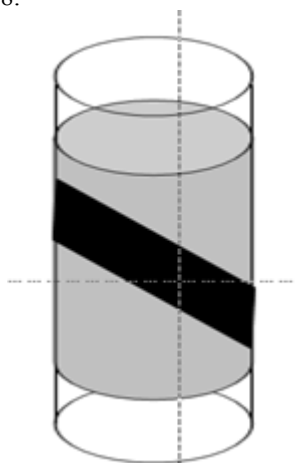


Рис. 8. Схема затвора с наклонной аномалией

В данном случае модель, представленная выше, можно использовать для расчетов распределения потенциала по продольным сечениям с учетом эффективной ширины кольца. В каждом сечении в зависимости от положения области возмущения распределение потенциала будет соответствовать похожим зависимостям, представленными на рис. 4 и 5. Далее следует объединить полученные результаты по угловой координате при фиксированном значении продольной (z) координаты. Альтернативный способ – численно решить 3-х мерное уравнение Пуассона с соответствующими граничными условиями [12]. На рис 9 представлено распределение потенциала для случая для прототипов

с ультра короткой РО ($L_g=11$ нм) с эффективной шириной кольца $2l$ и углом наклона к аксиальной оси 45 град.

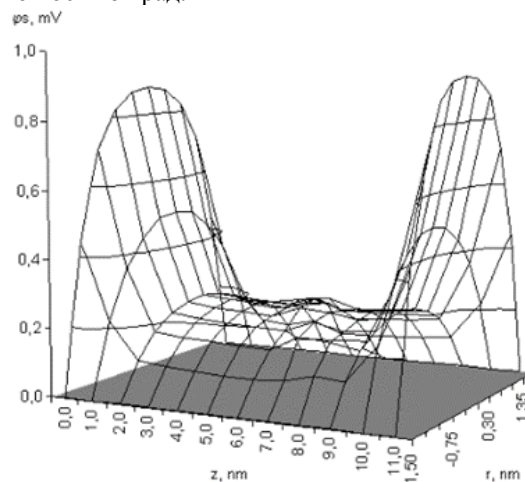


Рис. 9. 3D распределение потенциала

В центральной области амплитуда возмущения в два раза выше, чем в областях, максимально приближенных в истоку и стоку. Если фиксировать эффективную ширину, то характер зависимости распределения потенциала останется неизменным. Этот вывод применим для диапазона углов от 30 до 60 град. При небольших углах наклона до 12 град поведение потенциала практически не отличается от случая, когда кольцо перпендикулярно оси z . Соответственно, амплитуда возмущения ведет себя аналогичным образом - пропорционально изменяется в соответствии с изменением эффективной толщины кольца.

4. Результаты моделирования с учетом неравномерности границы

Шероховатость (неравномерность) границы (кромки) кольца вносит дополнительное изменение амплитуды возмущения потенциала. В общем случае задача моделирования влияния механизма ШГ решается при помощи преобразования Фурье гауссовых спектров [22], [33]. Эти спектры зависят от длины корреляции (Λ) и среднеквадратичного отклонения (Δ). Параметр Λ соотносит распределение деформации границы в соседних точках. Параметр Δ - это высота деформации или отклонение границы от идеальной в направлении вдоль поверхности затвора. Однако, поскольку первоначальная задача отображает маловероятный частный случай, а представление ШГ в виде спектров задача не столько трудоемкая, сколько ресурсозатратная, то мы

рассмотрели два вида неравномерности: плавный (синусоидальный) и резкий (пилообразный) с несколькими значениями периода. При этом считали, что в длину окружности поперечного сечения РО укладывается целое число периодов. А также подразумевалось, что данные профили соответствуют случайным некоррелированным значениям Λ и Δ . Значение параметра Δ во всех случаях составляла 0.51. Мы анализировали случаи для одного, двух, 5-ти и 10-ти периодов для центральной зоны локализации возмущения работы выхода. При симметричном синусоидальном законе деформации обеих границ не отмечено изменение амплитуды возмущения потенциала при любых положениях кольца вдоль оси z. Этот факт объясняется тем, что сохраняется «эффективная» (усредненная) ширина кольца. Аналогичный вывод применим, если закон деформации границы кольца соответствует пилообразной функции. Ситуация изменяется, когда границы деформируются со сдвигом в полпериода. Для больших периодов изменения не отмечены. Для малых периодов для случая плавных границ отмечен рост амплитуды возмущения потенциала примерно 0.3% на период, для резких - 0.5% на период. Более существенные изменения в амплитуде проявляются, если законы деформации кромок не совпадают. Например, для случая, когда одна граница синусоидально изменяется за один период, а другая за 10, то амплитуда возмущения потенциала повысилась на 6%. Для случая, если одна граница изменяется по синусоидальному закону с 10-ти кратным периодом, другая «пила» с одним периодом, то рост потенциала на 7%. Если одна граница – однопериодный синус но с удвоенным Δ , другая «пила» с 10-ти кратным периодом, рост на 9%. Поэтому дополнительное смещение потенциала очень существенно зависит от взаимной формы границ. Изменение амплитуды возмущения потенциала более 10% тоже возможны. Например, в случаях большой асимметрии границ. Если одна граница - полупериодный синус, а другая полупериодный «пила», то отмечен рост амплитуды на 12%. Следует отметить, что при большой асимметрии, которая уменьшает «эффективную» ширину кольца, например, в представленном выше случае, только границы вогнуты во внутрь кольца, мы наблюдаем снижение амплитуды возмущения на 11%. Однако, необходимость систематизировать влияние ШГ, по нашему мнению, будет выявлена при исследова-

нии влияния на транспорт носителей и в конечном итоге на ток транзистора и другие его ключевые характеристики.

5. Заключение

На основе аналитического решения 2D уравнения Пуассона разработана аналитическая модель для анализа чувствительности распределения потенциала кремниевых полевых GAA нанотранзисторов к аномальному поведению зернистости металлического затвора. Количественно проанализированы вариации распределения потенциала в транзисторах с короткой и тонкой рабочей областью с длиной от 25 до 11 нм. Показана зависимость возмущения потенциала от расположения аномальной зернистости на затворе. Установлена линейная зависимость амплитуды возмущения от величины скачка работы выхода. Неравномерность границ аномальной области вносит дополнительный вклад в трансформацию потенциала. При примерно одинаковых деформациях границ вклад данного механизма не существенен. При значительной асимметрии границ вклад может превышать 10% от возмущения сгенерированного идеальным кольцом. Подчеркнем, что для кремниевых полевых GAA нанотранзисторов аномальное поведение зернистости металлического затвора усиливается в процессе скейлинга.

Изменение рабочей функции затвора оказывает эффективное воздействие на электро-физические характеристики кремниевых полевых GAA нанотранзисторов. Поскольку составляющие исследуемого механизма имеют случайный характер, то адекватная оценка степени их влияния на электро-физические характеристики кремниевых полевых GAA нанотранзисторов с цилиндрической геометрией играет важную роль. Однако, в отличие от других транзисторных архитектур, нет возможности контролировать с помощью дополнительной регулировки влияние неравномерность работы выхода металлического затвора.

Публикация выполнена в рамках НИР ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003 "Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов".

Sensitivity of the Potential Distribution in the Channel of Silicon GAA Nanotransistors to the Anomalous Behavior of the Metal Gate Grain

N. Masalsky

Abstract. The influence of the anomalous grain size of the metal gate of a silicon field-effect GAA nanotransistor with cylindrical geometry on the potential distribution in its working area is discussed. Based on the analytical solution of the 2D Poisson equation, an analytical model has been developed to analyze the sensitivity of the potential distribution of silicon field GAA nanotransistors to the abnormal behavior of the metal gate grain. The variations of the potential distribution in transistors with short and thin working areas with a length from 25 to 11 nm are quantitatively analyzed. The dependence of the potential perturbation on the location of the abnormal grain on the gate is shown. The linear dependence of the amplitude of the disturbance on the magnitude of the output operation jump is established. A mathematical model of the fluctuation of the potential distribution has been developed, including variations in the unevenness of the boundaries of the anomalous grain area. The nonuniformity of the boundaries of the anomalous region makes an additional contribution to the transformation of the potential. With approximately the same deformations of the boundaries, the contribution of this mechanism is not significant. With a significant asymmetry of the boundaries, the contribution can exceed 10% of the perturbation generated by the ideal ring.

Keywords: silicon cylindrical nanotransistor with a surrounding gate, anomalous grain size of a metal gate, potential distribution, Poisson's equation, modeling

Литература

1. International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), More Moore. 2017. Available online: <https://irds.ieee.org/roadmap-2017> (accessed on 15 September 2022).
2. J.S. Yoon, T. Rim, J. Kim, K. Kim, C.K. Baek, Y.H. Jeong. Statistical variability study of random dopant fluctuation on gate-all-around inversion-mode silicon nanowire field-effect transistors // "Appl. Phys. Lett.", (2015), V. 106, 103507
3. D. Nagy, G. Indalecio, A.J. Garcia-Loureiro, M.A. Elmessary, K. Kalna, N. Seoane. FinFET versus gate-all-around nanowire FET: performance, scaling, and variability. // "IEEE Journal of the Electron Devices Society", (2018), V. 6, 332-40.
4. M. Onobajo, J. Silva-Martinez. Analog circuit design for process variation-resilient systems-on-a-chip. Dordrecht: Springer, 2012.
5. M.M. Tehranipoor, U. Guin, D. Forte. Counterfeit integrated circuits: Detection and Avoidance. Springer, 2015.
6. I. Ferain, C.A. Colinge, J. Colinge. Multigate transistors as the future of classical metal-oxide-semiconductor field-effect transistors // "Nature", (2011), V. 479, 310-316.
7. K. Kuhn, C. Kenyon, A. Kornfeld, M. Liu, A. Maheshwari, W.K. Shih, S. Sivakumar, G. Taylor, P. VanDerVoorn, K. Zawadzki. Managing process variation in Intel's 45nm CMOS technology // "Intel Technology Journal", (2008), V. 12, 93-109.
8. J. A. Croon, W. Sansen, H.E. Maes. Matching properties of deep sub-micron MOS transistors, Springer, 2005
9. S.K. Saha. Modeling process variability in scaled CMOS technology. // "IEEE Design Test of Computers", (2010), V. 27, 8-16.
10. K. K Young. Analysis of conduction in fully depleted SOI MOSFETs // "IEEE Trans. Electron Devices", (1989), V. 36, No. 3, 504-506.
11. Н.В. Масальский. Влияние зернистости металлического затвора кремниевых конических GAA нанотранзисторов на флуктуации порогового напряжения // "Труды НИИСИ РАН", (2023), Т. 60, № 6, 387-393
12. Н.В. Масальский. Моделирование ВАХ ультратонких КНИ КМОП нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором // "Микроэлектроника", (2021), Т. 60, № 6, 387-393