

06

Новый подход к созданию наноэлектронных систем в размерно-квантующем потенциальном рельефе встроенных зарядов в изолирующих слоях у поверхности полупроводника

© *Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан*

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Поступило в Редакцию 27 августа 1998 г.

Анализируется возможность формирования перестраиваемых наномасштабных электронных систем пониженной размерности путем создания в диэлектрике у его межфазной границы с полупроводником регулярного распределения локальной плотности заряда, индуцирующего в приповерхностной области полупроводника двумерный потенциальный рельеф. Профилирование распределения заряда, например посредством сканирования поверхности диэлектрика острием туннельного микроскопа, позволяет, в принципе, организовать всевозможные размерно-квантованные структуры: квантовые ямы, точки, проволоки, сверхрешетки и т.д. Перспективность реализации этого принципа рассматривается на примере системы кремний–окисел.

Современные подходы к организации наноэлектронных систем базируются на традиционных методах эпитаксии, локального легирования, литографии и т.д. [1], а также на модификации поверхности твердых тел посредством силового воздействия острия сканирующего туннельного микроскопа [2]. Рассмотрим принципиально иную возможность создания элементов и структур нанометровых масштабов, основанную на регулярной вариации зарядового состояния изолирующего слоя у его контакта с полупроводником. Формирование того или иного распределения локальной плотности заряда в диэлектрике, индуцирующего в приповерхностной области полупроводника двумерный потенциальный рельеф, позволит реализовать всевозможные низкоразмерные структуры: квантовые ямы, точки, проволоки, сверхрешетки и пр.

Перспективы реализации этого принципа целесообразно проанализировать на примере системы кремний–окисел в силу сочетания ее уникальных физико-химических свойств с высокой технологической отработанностью. Среди известных механизмов создания встроенных зарядов в окисле выделим два: 1) инжекцию и захват электронов (дырок) в объеме SiO_2 или на его границе с Si_3N_4 , 2) миграцию ионов по окислу и их взаимодействие с электронами кремния. Для масштабов размерного квантования $\delta \cong 100 \text{ \AA}$ амплитуда потенциального рельефа $\Delta U \cong 1 \text{ eV}$ достигается при глубине модуляции плотности встроенного заряда $\Delta N_s = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ($\Delta U \sim q^2 \Delta N_s \delta / \kappa$, q — элементарный заряд, κ — средняя диэлектрическая проницаемость области границы раздела). Плотности встроенного электронного (дырочного) заряда указанного порядка достаточно легко создаются посредством туннельной или лавинной инжекции в окисный слой в неразрушающих электрических полях $\leq 5 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$ [3,4]. Длительное (до 10^8 s) сохранение инжектированного заряда типично, например, для запоминающих устройств, содержащих электронные состояния, локализованные на контакте туннельный окисел–нитрид кремния [5]. Достаточно высокие значения $N_s \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ получаются при миграции по окислу положительных ионов щелочных металлов, имеющей место при повышенных ($\geq 100^\circ \text{ C}$)¹ температурах в поляризующих полях $\approx 1 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ [7]. Длительность сохранения в окисле созданных таким путем у поверхности Si зарядов при комнатных, а тем более пониженных температурах, где квантовые эффекты наиболее существенны, превышает 10^8 s (характерные значения энергии активации миграции достигают $0.8\text{--}1.5 \text{ eV}$ [8,9]).

Таким образом, задача создания нанoeлектронных систем сводится к варьированию плотности встроенного заряда вдоль межфазной границы диэлектрик–полупроводник.

Известно свойство встроенных в диэлектрик электронных и ионных зарядов формировать спонтанные образования субмикронных размеров, радикально влияющие на электронные характеристики контакта кремний–окисел [10,11]. Например, перемещение подвижных положительных ионов, присутствующих в SiO_2 , к границе раздела с кремнием сопровождается образованием стабильных ”пятен” встроенного заряда

¹ По некоторым данным [6] миграция ионов в окисле кремния наблюдается при комнатных и даже более низких температурах.

с плотностью $\geq 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и с размерами $\sim 100 \text{ \AA}$, в краевых полях которых вследствие эффекта Франца–Келдыша наблюдается генерация неосновных носителей заряда [11]. Расположение таких пятен по поверхности, по-видимому, хаотично, тем не менее электроны в потенциальных ямах, созданных этими пятнами, должны обнаруживать свойства, типичные для нульмерных систем.²

Создание регулярного распределения встроенного заряда соответствующих масштабов вдоль межфазной границы диэлектрик–полупроводник возможно на основе современной техники сканирующей туннельной микроскопии. При этом локальная плотность встраиваемого заряда определяется разностью потенциалов острие–полупроводник и временем экспозиции в данной точке, а геометрические размеры заряжаемой области лимитируются величиной зазора между острием и поверхностью полупроводника, т.е. фактически толщиной изолирующего слоя. Последнее обстоятельство не должно ограничивать возможности формирования размерно-квантованных систем, поскольку, в частности, в системе Si/SiO₂ высококачественные изолирующие слои можно вырастить, начиная с толщин порядка десятка ангстрем.

Несмотря на очевидную реалистичность предлагаемого подхода в создании размерно-квантованных систем, исследования в этом направлении практически не ведутся. Идеологически близкая работа выполнена в Стенфордском университете (США) [12]. Она посвящена локальной перезарядке пограничных состояний в структуре Si₃N₄–SiO₂–Si. В неоптимальных условиях (суммарная толщина изолирующего слоя 500 Å) в [12] достигнуто пространственное разрешение 1500 Å при длительности хранения записанной информации (матрица 128 × 128 точек) 7 дней.³

Укажем в заключение интересные пути расширения функциональных возможностей квантовых элементов и наноэлектронных систем за счет использования окисла, насыщенного ферромагнитными ионами. Известно, например, что положительные ионы железа подвижны в SiO₂, а электронные уровни, связанные с ними, локализованы на границе

² Механизмы формирования подобных образований могут обуславливать принципиальную возможность самоорганизации упорядоченных низкоразмерных структур.

³ Знаменательно, что аналогичный по своей физической сущности нетрадиционный технологический поиск проводится в сфере "макроскопической" электроники. Путем "замораживания" задаваемого термополевым обработкой ионного рельефа в системах со смешанной ионно-электронной проводимостью формируются эффективные выпрямляющие и светоизлучающие элементы на основе $p-i-n$ -переходов, индуцированных пространственно локализованным ионным зарядом [13].

раздела Si/SiO₂ ниже дна зоны проводимости кремния [14], что позволяет варьировать их зарядовое состояние за счет эффекта поля. Изменение конфигурации распределения таких ионов позволит помимо потенциального рельефа создать "магнитный" рельеф, управляемый сравнительно слабым внешним магнитным полем и степенью обогащения поверхности полупроводника электронами. Таким образом приобретаются дополнительные "степени свободы" для управления нанoeлектронными системами. Ряд конкретных эффектов такого рода для однородных вдоль межфазной границы систем рассмотрен в [15]. Наконец, в самой сути рассматриваемого подхода заложены возможности перестройки конфигурации (стирания, перезаписи) низкоразмерных систем.

Список литературы

- [1] *Тезисы докладов III Всероссийской конференции по физике полупроводников. "Полупроводники 97"*. М.: Изд-во ФИАН, 1997.
- [2] *Лускинович П.Н., Никитин В.И.* // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1991. В. 3. С. 27–31.
- [3] *Sah S.T.* // Sol. St. Electr. 1990. V. 33. N 2. P. 147–167.
- [4] *Di Maria D.J., Stasiak J.W.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 6. P. 2342–2356.
- [5] *Белый В.И., Васильева Л.Л., Гриценко В.А.* и др. // Нитрид кремния в электронике / Под ред. Ржанова А.В. Новосибирск: Наука, 1982. 180 с.
- [6] *Hillen M.W., Hemmes D.G.* // Sol. St. Electr. 1981. V. 24. N 8. P. 773–780.
- [7] *Hicmott T.W.* // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 6. P. 2583–2598.
- [8] *Boudry M.R., Stagg J.P.* // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 2. P. 942–950.
- [9] *Stagg J.P., Boudry M.R.* // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. N 2. P. 885–899.
- [10] *Гольдман Е.И., Ждан А.Г., Сумарока А.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. № 12. С. 783–787.
- [11] *Гольдман Е.И., Ждан А.Г., Пономарев А.Н.* // ФТП. 1994. Т. 28. № 11. С. 1947–1959.
- [12] *Barret R.C., Quate C.F.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. N 5. P. 2725–2733.
- [13] *Gao J., Yu G., Heeger A.J.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. N 10. P. 1293–1295.
- [14] *Вертопрахов В.Н., Кучумов Б.М., Сальман Е.Г.* // Структура и свойства структур Si–SiO₂–М. Новосибирск: Наука, 1981.
- [15] *Балкарей Ю.И., Луцкий В.Н., Петров В.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 54. № 8. С. 449–452.