

06

Модель для описания особенности на аккумуляционной ветви вольт-фарадных характеристик МОП-конденсаторов с наночастицами кремния в окисле

© В.А. Стучинский, Г.Н. Камаев, М.Д. Ефремов, С.А. Аржанникова

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск

E-mail: stuchin@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 27 марта 2012 г.

Предложена модель для описания особенности, формирующейся на НЧ ВФХ МОП-конденсаторов с нановключениями Si в окисле. Возникновение особенности связывается с изменением на частоте измерения ВФХ заряда, накапливающегося в окисле в результате инжекции носителей заряда из контактов и их туннельной миграции сквозь окисел по линейным цепочкам наночастиц в условиях разброса туннельных расстояний в цепочках. Свойства модели проиллюстрированы на простейшем примере МОП-конденсатора с планарным массивом кремниевых нанокристаллов в окисле и монополярной инжекцией дырок из слоя обогащения p -полупроводника. Приведена вольт-фарадная кривая, измеренная на конденсаторе с кластерами аморфного кремния в окисле, которая весьма напоминает кривые с двугорбой особенностью, предсказываемые моделью.

Известно, что плотность кремниевых включений в слоях окисла кремния может быть достаточно велика для того, чтобы изменение заряда на таких включениях, осуществляющееся непосредственно в процессе измерения структур с указанными слоями, могло проявляться в измеряемых электрических характеристиках структур. Действительно, в литературе сообщалось, что вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МОП-конденсаторов с наночастицами кремния в окисле проявляют особенность в виде одиночного пика емкости либо более сложной структуры, формирующейся на аккумуляционной ветви характеристик [1–6]. В пределах этой особенности, проявляющейся на достаточно низкой частоте измерения, измеренная емкость конденсатора C

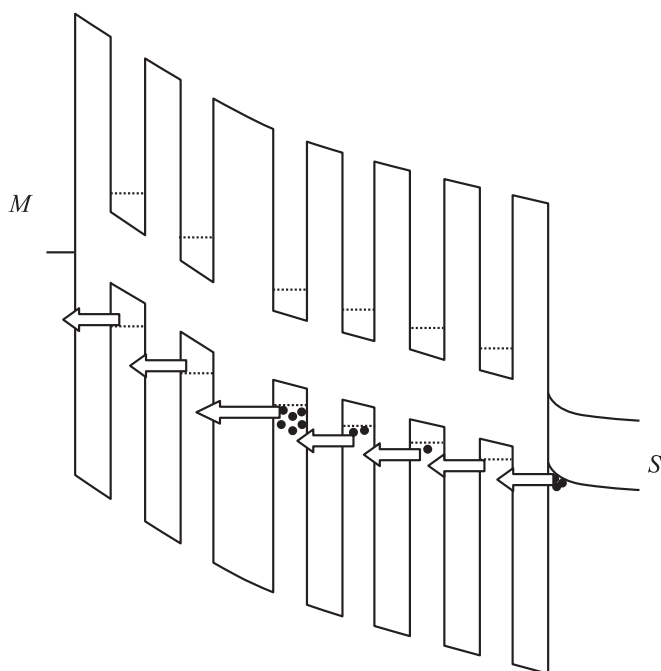


Рис. 1. Транспорт заряда сквозь окисел в МОП-конденсаторе с включениями кремниевых наночастиц в окисле в условиях монополярной инжекции дырок из p -полупроводника. M — металл, S — полупроводник.

может превосходить емкость C_a идеального (без наночастиц в окисле) МОП-конденсатора. Пик емкости возникает в некотором интервале прикладываемых напряжений U , которому предшествует традиционный участок ВФХ с величиной емкости, близкой к C_a . С возрастанием U измеряемая емкость конденсатора сначала возрастает до некоторой максимальной величины, а затем уменьшается до меньшего уровня, близкого к C_a , возможно, проявляя локальный минимум [1]. Сообщалось, что измерения емкости C в рассматриваемом интервале напряжений весьма неустойчивы и подвержены влиянию гистерезисных явлений.

Формирование указанной особенности ВАХ может быть понято в рамках модели, основанной на следующих предположениях (рис. 1): I — в смещенном МОП-конденсаторе имеет место инжекция носителей

заряда из одного или обоих контактов (скажем, дырок из p -полупроводника) в окисел с последующим транспортом инжектированного заряда сквозь окисел по системе кремниевых наночастиц (например, кремниевых нанокристаллов (НК)); 2 — транспорт заряда осуществляется путем туннельной миграции дырок вдоль нанокристаллических (нк-) цепочек самосогласованно с установлением электрического поля в окисле; 3 — в нк-цепочках туннельные барьеры имеют разброс по ширине, так что самый широкий барьер представляет собой „узкое место“ (УМ) для транспорта дырок. При измерении низкочастотных (НЧ) ВФХ по мере возрастания приложенного к конденсатору напряжения U становятся возможны туннельные перескоки дырок из обогащенного слоя полупроводника в близлежащие НК с дальнейшим транспортом сквозь окисел. Для осуществления таких перескоков требуется некоторое критическое поле, величина которого определяется присутствием пустых дырочных состояний в НК напротив края валентной зоны полупроводника. Последнее обстоятельство объясняет традиционное начальное поведение аккумуляторной ветви ВФХ конденсатора с нанокристаллами кремния в окисле при малых напряжениях U . С дальнейшим ростом U НК в области между УМ и подложкой заряжаются инжектированными дырками. Эта зарядка способствует возрастанию электрического поля в области между УМ и металлом, в результате чего туннельный барьер в УМ в конце концов трансформируется из трапецеидального в треугольный, и оказывается возможной эмиссия захваченных на НК дырок в валентную зону диэлектрика. В результате УМ „открывается“ и накопленный в окисле заряд σ_{ox} уменьшается. Описанные процессы изменения зарядового состояния НК и приводят к появлению обсуждаемой особенности на НЧ ВФХ МОП-конденсаторов, что было продемонстрировано проведенными компьютерными расчетами.

В расчетах рассматривался случай МОП-конденсаторов на кремниевой подложке p -типа проводимости (концентрация легирующей примеси $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) с нанокристаллами Si в окисле, образующими нк-слои. Слоевая плотность НК в каждом слое предполагалась равной $2.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ (НК размером 1 nm с латеральным расстоянием между ними 1 nm). В направлении, перпендикулярном плоскости конденсатора, рассматривались различные расположения одного или нескольких уширенных туннельных зазоров в цепочке эквидистантно расположенных НК. Поскольку основное внимание в работе было сконцентрировано на электрическом аспекте задачи, дискретный элек-

тронный спектр ям заменялся однородным энергетическим распределением дырочных состояний в ямах выше энергии основного дырочного состояния в НК. Физически подобное размытие дискретного электронного спектра НК может возникать, например, как следствие дисперсии их размеров. Для лучшего проявления существа модели инжекция электронов из металла предполагалась „выключенной“ (например, из-за низкого положения уровня Ферми в металле). В схематической модели полагалось, что электрический потенциал падает только в зазорах между НК без падения потенциала в самих НК. Предполагалось, что связанные в НК дырки могут туннелировать в НК, расположенный ниже по полю, при условии наличия в последнем свободных мест на том же уровне энергии. В сильном электрическом поле учитывалась возможность туннельной эмиссии дырок в валентную зону окисла. Предполагалось, что эмитированные дырки быстро стекают в металл по валентной зоне диэлектрика, не внося существенного вклада в объемный заряд в окисле (в простой модели мы пренебрегали повторным захватом дырок на НК). Расчет электрических характеристик МОП-конденсатора производился путем решения системы нелинейных уравнений, включающих уравнения непрерывности для тока и поля; последующего решения линеаризованной системы уравнений для гармонических добавок, и подсчета полного (с учетом тока смещения) тока через диэлектрик.

Принципиальные черты модели могут быть поняты уже на простейшем примере МОП-конденсатора, каждая нк-цепочка которого содержит всего один НК, расположенный в соответствии с положениями модели ближе к полупроводнику. В случае, когда НК во всех наночепочках находятся на одном и том же удалении от контактов, фактически мы имеем случай двухбарьерной структуры, средняя область которой, представляющая собой встроенный в окисел планарный нк-массив, несет на себе значительный заряд, модифицирующий поле в диэлектрике с образованием характерного излома потенциала внутри окисла. Результаты расчета электрических характеристик МОП-конденсаторов с разным соотношением ширин туннельных барьеров, $d_1/d_2 = 2/3$ нм и $1.5/3.5$ нм (соответственно МОП-1 и МОП-2, индексы нумеруют зазоры со стороны полупроводника), приведены на рис. 2.

Видно, что в соответствии с приведенным выше описанием эволюции электрического состояния конденсатора заряд σ_{ox} проходит через максимум при некотором напряжении U^* , зависящем от соотношения ширин туннельных барьеров. При этом на низкочастотной

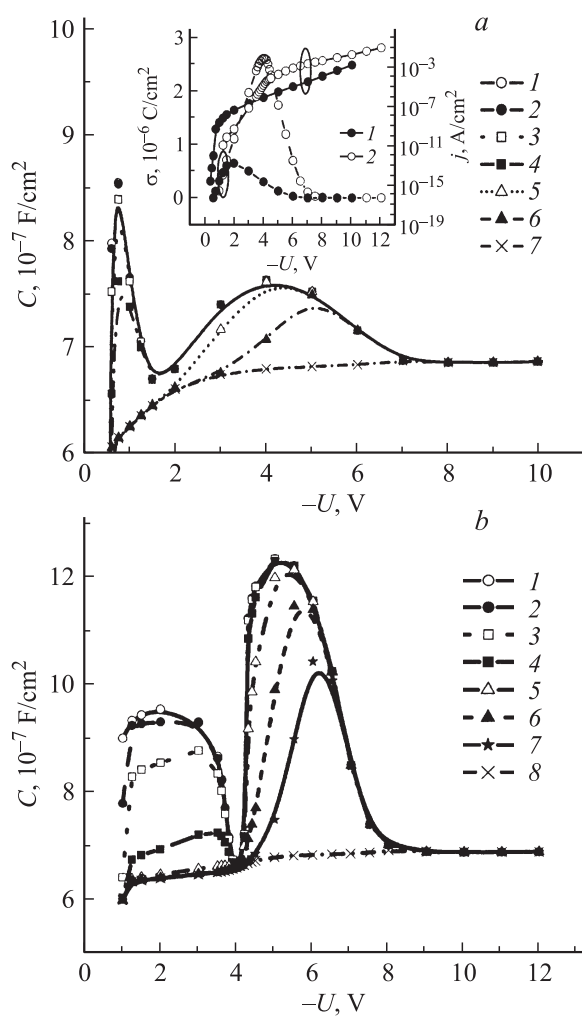


Рис. 2. Рассчитанные для разных частот ВФХ конденсаторов МОП-1 (а) и МОП-2 (b). а — частота $f[\text{Hz}] = 0$ (1), 0.0003 (2), 0.001 (3), 0.003 (4), 0.1 (5), 1(6), 1000(7); b — частота $f[\text{Hz}] = 0$ (1), 1 (2), 3 (3), 10 (4), 30 (5), 100 (6), 300 (7), 100 000 (8). На вставке: плотность слоевого заряда в нк-слое σ в зависимости от напряжения U и статические ВАХ конденсаторов; кривые 1 и 2 соответствуют конденсаторам МОП-1 и МОП-2.

ВФХ конденсатора возникают два пика емкости, максимумы которых наблюдаются, когда скорость изменения (возрастания или убывания) заряда σ_{ox} с напряжением U достигает максимума. Между пиками имеет место провал емкости (в латерально-однородной структуре — до уровня, соответствующего емкости C_a идеального (без наночастиц в окисле) МОП-конденсатора). Минимум емкости в провале наблюдается тогда, когда величина заряда в окисле достигает максимума. В латерально-неоднородной структуре участкам площади с разными значениями параметров будут соответствовать ВФХ с различной формой обсуждаемой особенности. Последнее будет приводить к „замыканию“ провала емкости C в суммарной CV -кривой. Очевидно, что величина провала при этом может служить мерой степени латеральной однородности электрических свойств латерально-неоднородной структуры. Переход от режима с накоплением заряда в окисле к режиму с его убыванием проявляется также и в изменении наклона статических ВАХ, построенных в координатах $\ln(j) - U$ (вставка на рис. 2). С повышением частоты измерений пики емкости на кривых $C(U)$ исчезают, причем первым исчезает пик, наблюдаемый при меньшем (по абсолютной величине) значении U (рис. 2).

Экспериментально особенность на ВФХ реальных структур, весьма напоминающая двугорбые кривые, предсказываемые рассмотренной моделью, наблюдалась нами в [1] в емкостных измерениях МОП-конденсаторов с кластерами a -Si в окисле (рис. 3). Непринципиальным отличием ситуации, реализованной в [1], от рассмотренного выше случая являлось то, что, по-видимому, инжектирующим контактом в [1] являлся контакт с металлом, а инжектированными носителями были электроны.

Аналогичным способом могут быть рассмотрены и более сложные случаи с транспортом носителей заряда по нк-конфигурациям, содержащим множество кремниевых наночастиц и одно или несколько УМ, по нк-конфигурациям с наличием боковых тупиковых ветвей нк-цепочек, а также по конфигурациям, содержащим нк-цепочки с неидентичной структурой туннельных зазоров. Выборочные расчеты и качественные соображения приводят к выводу, что общей чертой всех указанных ситуаций является сохранение выявленной особенности в поведении заряда σ_{ox} как функции U : зависимость $\sigma_{ox}(U)$ всегда проходит через максимум с соответствующими последствиями для формы НЧ ВФХ конденсаторов (двугорбая структура рассматриваемой особенности ВФХ).

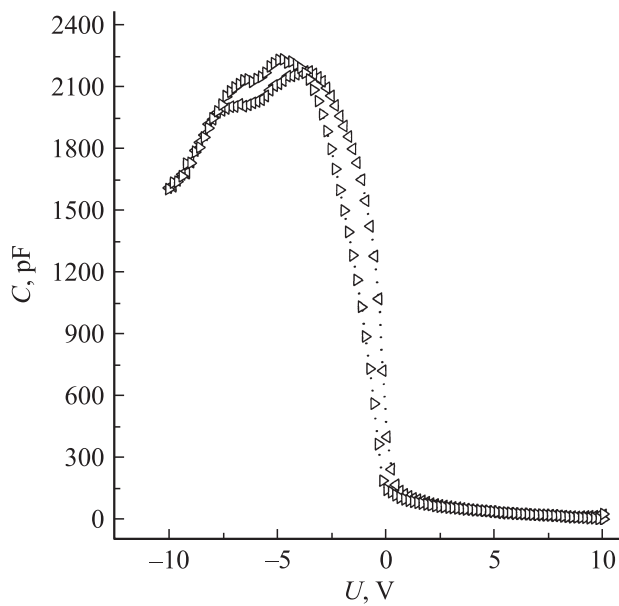


Рис. 3. ВФХ МОП-конденсатора с аморфными включениями кремния в окисле ($d_1/d_2 = 20/6$ nm), измеренные при разном направлении развертки напряжения на конденсаторе ($f = 3$ kHz) [1].

Отметим еще для общности, что характерные черты рассмотренной модели, очевидно, являются нечувствительными к конкретному механизму переноса носителей заряда сквозь окисел; транспорт носителей может включать промежуточное туннелирование по иным (не связанным с кремниевыми наночастицами) состояниям в окисле, например, по состояниям в хвостах зон. Также отметим, что присутствие в модели УМ в принципе не является обязательным для наблюдения описанного выше характерного поведения зависимости $\sigma_{ox}(U)$ с максимумом. Действительно, расчеты нк-цепочек с эквидистантным расположением наночастиц показывают, что и в этом случае накопленный в окисле заряд также вначале растет, а затем убывает как функция U . Присутствие в нк-цепочках УМ способствует лишь накоплению в окисле большего заряда, что делает обсуждаемую двугорбую особенность в НЧ ВФХ конденсаторов более выраженной. Нетрудно видеть,

что эта особенность также становится более выраженной в ситуации, когда в окисле имеет место встречный транспорт носителей заряда по нк-цепочкам, являющийся следствием их биполярной инжекции в окисел из противоположных контактов.

Результаты работы могут быть полезны для характеристики нк-систем, сформированных с окисле МОП-конденсаторов, а также для изучения транспортных свойств диэлектрических материалов.

Список литературы

- [1] Аржанникова С.А., Ефремов М.Д., Камаев Г.Н., Марин Д.В., Володин В.А., Воценок А.А. // Сборник трудов VI Международной конференции „Аморфные и микрокристаллические полупроводники“ 7–9 июля 2008 г. Санкт-Петербург: Политехнический университет, 2008. С. 162–163.
- [2] Ефремов М.Д., Камаев Г.Н., Володин В.А., Аржанникова С.А., Качурин Г.А., Черкова С.Г., Кретишин А.В., Малютина-Бронская В.В., Марин Д.В. // ФТП. 2005. Т. 39. В. 8. С. 945–952.
- [3] Shi J., Wu L., Huang X., Liu J., Ma Z., Li W., Li X., Xu J., Wu D., Li A., Chen K. // Sol. St. Communications. 2002. V. 123. P. 437.
- [4] Yu L.W., Chen K.J., Wu L.C., Dai M., Li W., Huang X.F. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 245 305.
- [5] Евтух А.А., Литовченко В.Г., Братусь О.Л., Кизяк А.Ю. // Материалы II Международной научной конференции „Наноструктурные материалы — 2010“. Россия–Белоруссия–Украина, Киев, 19–22 октября 2010 г. С. 419.
- [6] Antonova I.V. Electrical properties of semiconductor nanocrystals and quantum dots in dielectric matrix, in: Torchynska T.V., Vorobiev Yu.V. (editors). Nanocrystals and Quantum Dots in Group IV Semiconductors Ranch: American Scientific Publishers, 2010. P. 149–815.