**Слабое проявление эффекта поля в структурах металл-диэлектрик-полупроводник с сегнетоэлектрическим изолирующим слоем BaxSr1-xTiO3[[1]](#footnote-1)**

Белорусов Д.А., Гольдман Е.И., Чучева Г.В.

*Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.*

[*gvc@ms.ire.rssi.ru*](mailto:gvc@ms.ire.rssi.ru)

***Аннотация:*** *Определена причина слабого проявления эффекта поля в структурах металл-сегнетоэлектрик-кремний (МСЭП) с изолирующим слоем BaxSr1-xTiO3 (BST). В пароэлектрическом состоянии измерены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МСЭП и металл-сегнетоэлектрик-металл (МСЭМ) структур, определено значение ёмкости flat-band и получена зависимость падения напряжения на Si от внешнего напряжения. Выявлено, что практически всё внешнее поле экранируется зарядами в переходном слое между BST и Si.*

Развитие существующих систем записи и хранения информации, выполненных по кремниевой технологии, столкнулось с проблемой масштабирования. Толщины диэлектрических слоёв в таких структурах достигают значения нескольких ангстрем, что сопоставимо с атомарными размерами кристаллических решёток. В связи с этим для таких структур свойственны большие значения токов утечки, пагубно влияющих как на долговечность, так и на энергопотребление. Для решения данной проблемы производится поиск материалов, способных заменить традиционный окисел кремния. Эти материалы должны обладать высоким значением диэлектрической проницаемости, малым значением диэлектрических потерь и совместимостью с существующей кремниевой технологией. Одним из перспективных материалов, обладающим этими уникальными свойствами, является BaSrTiO3. Исследование транзисторных структур с BST плёнками началось около 30 лет назад [1], но до настоящего времени нет литературных данных о создании рабочих транзисторных структур с сегнетоэлектрическими плёнками [2]. В ранее опубликованной работе [3] было выяснено, что одной из возможных причин слабого проявления эффекта поля является практически полное экранирование поляризации BST слоя зарядами электронных ловушек на границе раздела с полупроводником. В данной работе эти выводы подтверждены результатами на плёнках BST с другими толщинами. В едином технологическом цикле были изготовлены два типа структур с сегнетоэлектрическим слоем Ba0.8Sr0.2TiO3 толщиной 120 нм: первый тип Ni/BST/Si, второй тип Ni/BST/Pt/Si (МСЭМ). В качестве подложки для МСЭП структуры использовался Si n-типа Nd=2х1014см-3, а для структуры МСЭМ - подложка Si с подслоем Pt. Площадь электродов из никеля составила 2.7х10-4 см2. Процесс формирования структур, описание установок для формирования и исследования структур указаны в [4,5]. Исследование импеданса проводилось при частоте 1 MHz. В сегнетоэлектрическом состоянии выражение для зависимости ёмкости сегнетоэлектрической плёнки от приложенного напряжения должно опираться на трехмерное усреднение доменной поляризации по пространству. Для сведения проблемы распределения поляризации к одномерной необходимо, чтобы образец находился в параэлектрическом состоянии [6]. Для твёрдых многокомпонентных растворов свойственно размытие фазового перехода, при этом оно также зависит от толщины плёнки [7], поэтому в данной работе измерения проводились при температуре T=1210C, что существенно выше температуры фазового перехода BST, которая составляет 60-800С [8]. Полученные результаты для обеих структур представлены на рисунках 1 и 2. ВФХ структур металл/диэлектрик/полупроводник (МДП), где в качестве диэлектрика выступает SiO2, внешне схожи с ВФХ МСЭП объектов, но различаются по разнице величины емкостей верхнего и нижнего плато. Для МДП структур верхнее плато связано с обогащением полупроводника и практически совпадает с емкостью окисла, а нижнее плато соответствует обеднению полупроводника с пиннингом уровня Ферми за счет генерации неосновных носителей заряда, и разница между верхним и нижним плато составляет несколько порядков; для МСЭП структур эта разница незначительна и составляет всего несколько десятков пикофарад, в то время как разница максимального и минимального значений емкости для МСЭМ структур (рис. 2) существенна и составляет сотни пикофарад. Это объясняется практически полным экранированием внешнего поля зарядами в переходном слое между BST и Si. Падение внешнего напряжения на полупроводник мало, высокочастотная емкость структуры МСЭП определяется кремнием, а изгиб зон в нём отклоняется от состояния плоских зон всего на несколько *kT*/*q* во всём наблюдаемом диапазоне смещений, где *k* – константа Больцмана, *T* - абсолютная температура, *q* - элементарный заряд. Присущая высокой концентрации неупорядоченных ловушек буферного слоя U - образная энергетическая плотность локализованных состояний с минимумом в окрестности плоских зон кремния обусловливает резкое замедление повышения при обогащении и уменьшения при обеднении падения внешнего напряжения на полупроводнике. В свою очередь, это замедление приводит: во-первых, к образованию никак не связанных с сильным обогащением или инверсией поверхности полупроводника, двух плато полевых зависимостей высокочастотных характеристик импеданса структур МСЭП [9]. Измеренная максимальная ёмкость структуры МСЭП соответствует ёмкости, граничащей с BST заряженной областью кремния. Табулируя эту ёмкость в функции от изгиба зон полупроводника с использованием формул классической статистики [10], была получена зависимость падения напряжения на полупроводнике от внешнего напряжения (рис. 3).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | |  | |
| Рис.1. Высокочастотные полевые характеристики структуры Ni-Ba08Sr02TiO3-Si с толщиной сегнетоэлектрика 120 nm, измеренных при *T*=1210C. Кривые:  1 – емкость, 2 – проводимость | Рис.2. Высокочастотная вольт-фарадная характеристика Ni-Ba08Sr02TiO3-Pt с толщиной сегнетоэлектрика 120 nm, измеренных при *T*=1210C. | Рис.3. Зависимость изгиба зон *Vs* в кремнии от внешнего напряжения *Vg* в структуре  Ni-Ba08Sr02TiO3-Si |  | |

Из полученных данных было вычислено значение ёмкости flat-band, которое составило 9.17 пФ. Из рисунка 3 следует, что по модулю изгиб зон в кремнии многократно меньше приложенного напряжения. Малое отношение изгиба зон к приложенному напряжению объясняет появление плато при измерении ВФХ (рис. 1). Соответственно, предположение о слабом проявлении эффекта поля в МСЭП структурах с BST толщиной 330 нм [3] подтверждается и на более тонких слоях BST, что обусловлено перезарядкой поверхностных электронных ловушек на ГР, и именно эти локализованные состояния обеспечивают практически полное экранирование поляризации сегнетоэлектрического слоя. Оценочное значение концентрации ловушек не менее 1014   
см-2, которые перезаряжаются и при обеднении, и при обогащении полупроводника [11]. Проблема деактивации электронных ловушек в переходном слое может быть решена пассивацией оборванных связей, например, водородом, благодаря чему станет возможно формирование транзистора на базе МСЭП структуры.

**Список литературы**

1. Kawano H., Morii K., Nakayama Y. Effects of crystallization on structural and dielectric properties of thin amorphous films of (1−x)BaTiO3‐xSrTiO3 (x=0–0.5, 1.0) // J.Appl.Phys. 1993. Vol. 73. No 10. P. 5141.

2. Park J.Y., Yang K., Lee D.H., Kim S.H., Lee Y., Sekhar Reddy P.R., Jones J.L., Park. M.H. A Perspective on Semiconductor Devices Based on Fluorite-Structured Ferroelectrics from the Materials-Device Integration Perspective // J.Appl.Phys. 2020. Vol. 128. No 14. P. 240904 (1-24).

3. Goldman E.I., Chucheva G.V., Belorusov D.A. On the form of high-frequency voltage-capacitance characteristics of metal-insulator-semiconductor structures with a ferroelectric insulating layer BaxSr1-хTiO3.// Ceram. Int. 2021. Vol. 47. No. 15. P. 21248-21252.

4. Иванов М.С., Афанасьев М.С. Особенности формирования тонких сегнетоэлектрических пленок BaxSr1-xTiO3 на различных подложках методом высокочастотного распыления // ФТТ. 2009. Т. 51. №7. С. 1259-1262.

5. Киселев Д.А., Афанасьев М.С., Левашов С.А., Чучева Г.В. Кинетика роста индуцированных доменов в сегнетоэлектрических тонких пленках Ba0.8Sr0.2TiO3 // ФТТ. 2015. Т. 57. №6. С. 1134-1137

6. Гольдман Е.И., Нарышкина В.Г., Чучева Г.В. Исследования электрофизических свойств сегнетоэлектрических пленок Ba0.8Sr0.2TiO3 в параэлектрическом состоянии. // ФТТ. 2020. Т.62. №8. С. 1226-1231.

7. Смоленский Г.А., Боков В.А., Исупов В.А. и др. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Ленинград: Наука, 1971. 476с.

8. Acosta M., Novak N., Rojas V., Patel S., Vaish R., Koruza J., Rossetti G.A., Robel J. BaTiO3-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives. // Appl. Phys. Rev. 2017. No. 4. P. 041305.

9. Белорусов Д.А., Гольдман Е.И., Чучева Г.В. Влияние сильного статического электрического поля и нагрева на характеристики высокочастотного импеданса структур металл-сегнетоэлектрик-полупроводник. // ФТТ. 2022. Т.64. №5. С.556-559.

10. Sze S.M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 832p.

11. Гриценко В.А. Структура границ раздела кремний/оксид и нитрид/оксид. // УФН. 2009. Т. 52. №9. С.921-930.

1. Работа выполнена в рамках государственного задания и при поддержке РФФИ, грант № 19-29-03042мк. [↑](#footnote-ref-1)