

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА И ДИЭЛЕКТРИКА НА ЗАРЯДОВЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ МДП СТРУКТУР

Р. А. Муминов, В. Т. Малаева, М. М. Оксман,
Г. В. Ишмуратов, Х. Юнусова

Физико-технический институт им. С. В. Стародубцева Академии наук Узбекистана,
700084, Ташкент, Узбекистан
(Получена 22.06.1992. Принята к печати 13.07.1992)

Исследовались зарядовые свойства поверхности и границы раздела диэлектрик—полупроводник кремниевых МДП структур с Al-, Au-контактами с различного типа окисными диэлектриками в зависимости от степени однородности объема базового полупроводника и диэлектрика.

Показано, что в МДП структурах с Al-контактом на основе сравнительно однородного кремния с разбросом удельного сопротивления $\Delta\rho_v$ не более 10 % основное влияние на степень однородности энергетического спектра быстрых поверхностных электронных состояний (БПЭС) с временем релаксации $\tau_p \sim 10^{-6}$ с оказывает структурная неоднородность объема диэлектрика с доминирующим влиянием эффектов, обусловленных либо сквозной, либо релаксационной проводимостью.

В аналогичных структурах на основе структурно-неоднородного слабо легированного кремния с $\Delta\rho_v > 50$ % основное влияние на свойства БПЭС оказывает исходная неоднородность полупроводника, а на свойства медленных состояний (МПЭС) с $\tau_p \sim 10^{-3}$ с — структурная неоднородность объема диэлектрика. В то время как на указанных структурах с Al-контактом высокая структурная неоднородность поверхностных электронных состояний (ПЭС) с глубиной залегания в узких пределах запрещенной зоны (0.35 ÷ 0.55) эВ, основное влияние на свойства МПЭС и БПЭС акцепторной природы оказывает Au-контакт, обладающий высокой термической нестабильностью и миграционной способностью в процессе формирования МДП структур.

Приводятся сравнительные характеристики хлорной и фосфорной пассивации поверхности в оптимальных и неоптимальных режимах синтеза диэлектриков.

Структурная неоднородность базового полупроводника и диэлектрика в различного типа полупроводниковых слоистых системах может оказывать существенное влияние на поляризационные свойства как объема, так поверхности и границ раздела контактных фаз металл—диэлектрик—полупроводник. В работах [1-3], в частности, были рассмотрены некоторые механизмы этого влияния на физические свойства неоднородных структур металл—полупроводник—металл, металл—диэлектрик—металл (МПМ, МДМ) и МДП структур с точки зрения поляризационных процессов на точечных, протяженных объемных дефектах типа крупномасштабных ловушек (КМЛ) и поверхностных микроплазмах.

В данной работе приводятся результаты исследования влияния структурной неоднородности объема базового полупроводника и диэлектрика на зарядовые свойства поверхности и границы раздела диэлектрик—полупроводник (ДП) кремниевых МДП структур. Рассматриваются три типа МДП структур с различной степенью однородности объема полупроводника и диэлектрика. Оценка однородности полупроводника проводилась по величине разброса удельного сопротивления на пластине $\Delta\rho_v$. Оценка однородности объема диэлектрика проводилась по уровню диэлектрических потерь сквозной либо релаксационной проводимости по методике [4].

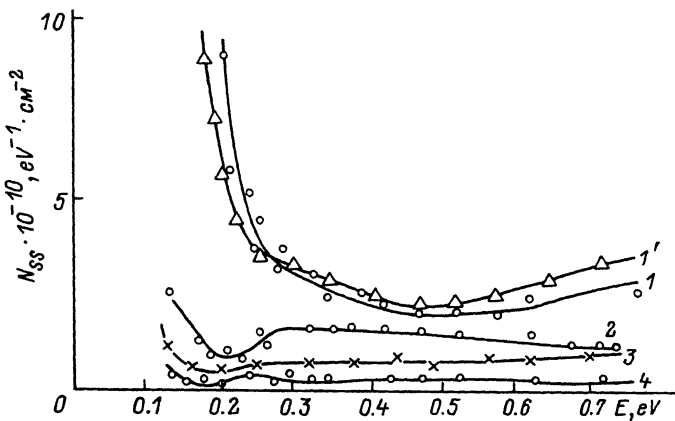


Рис. 1. Энергетический спектр БПЭС МДП структур типа 1. 1, 1' — окислы SiO_2 и SiO_{2n} , 2, 3 — ФСС, расход PCl_3 4—6%, 4 — окисел SiO_{2Cl} .

Первый тип МДП с Al-металлизацией и четырьмя типами окисных диэлектриков изготавливался на базе сравнительно структурного однородного кремния марки КЭФ 4 (100) с $\Delta\rho_v < 10\%$.

Второй тип МДП структур с Al-металлизацией с аналогичными высокотемпературными окисными диэлектриками изготавливался на основе стандартных эпитаксиальных структур типа 5 КЭФ 0.8 1a/380 ЭКГБ 0.5, получаемых методом газовой эпитаксии, с ориентацией рабочих поверхностей (111) с $\Delta\rho \approx 10\%$.

Третий тип МДП структур с Al-, Au-металлизацией толщиной (0.1+0.2) мкм с двумя типами низкотемпературных диэлектриков [пиролитическая двуокись кремния SiO_{2n} и моноокись кремния SiO толщиной $d \sim (0.5 \div 0.6)$ мкм] изготавливали на базе структурно-неоднородного кремния с КМЛ [2] с $\Delta\rho_v > 50\%$ марки БМД 1ГВ с кристаллографической ориентацией (111). Выбор низкотемпературных диэлектриков для этого типа МДП структур обусловлен высокой термической конверсией слабо легированного кремния [1, 2]. Пиролитическая двуокись кремния синтезировалась при $T = 620$ К в атмосфере моносилана кремния и кислорода по методике [5, 6]. Моноокись кремния термически наносилась в вакууме 10^{-5} Тор на подложку с $T = 300$ К по методике [6].

Высокотемпературные диэлектрики типа термического окисла SiO_2 , полученного в атмосфере сухого кислорода и аналогичной среде с 2—4 % хлора из жидкого источника трихлорэтилена SiO_{2Cl} , получали при $T = 1470$ К по методике [4]. Толщина окислов SiO_2 , SiO_{2Cl} составляла 0.12 мкм. Третий тип термического окисла SiO_{2B} толщиной 0.6 мкм получали в атмосфере сухого—влажного—сухого кислорода при $T = 1370$ К по методике [5]. Четвертый тип диэлектрика фосфоросиликатного стекла (ФСС) получали в два этапа. Загонку фосфора из жидкого источника треххлористого фосфора с расходом диффузанта в атмосфере сухого кислорода и азота 4 % проводили при $T = 1270$ К. Разгонку фосфора с эффектом геттерирования проводили по типовой методике планарной технологии [5]. Металлические электроды Al, Au наносились термическим испарением в вакууме при $T = 520$ К с последующим отжигом в азоте при $T = 750$ К [5].

Исследование зарядовых свойств поверхности и границ раздела ДП проводили путем измерения $G-V$, $G-V$ -характеристик МДП структур (G -комплексная проводимость) в диапазоне частот ($10^3 \div 10^6$) Гц и построения распределения плотности БПЭС и МПЭС по запрещенной зоне полупроводника по методике [7, 8].

На рис. 1 представлены распределения БПЭС по запрещенной зоне полупроводника с временем релаксации $\tau_p \sim 10^6$ с (энергетический спектр БПЭС).

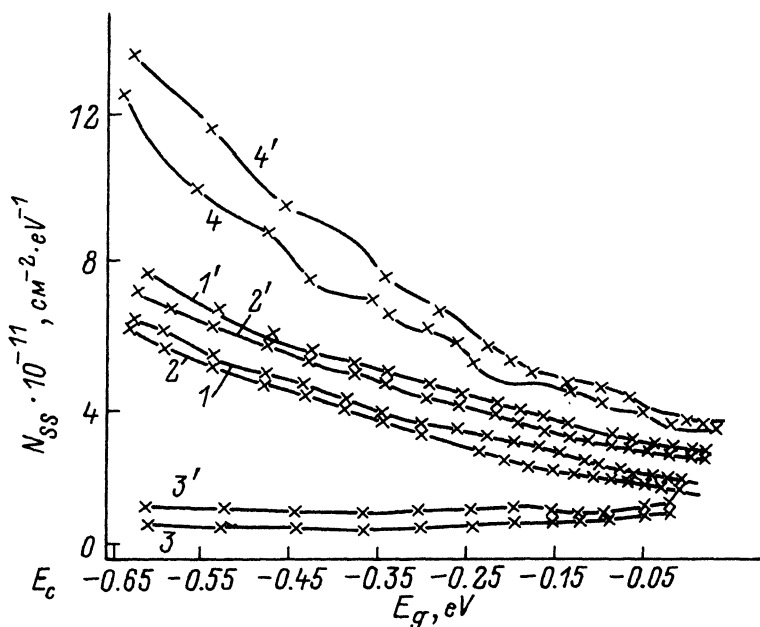
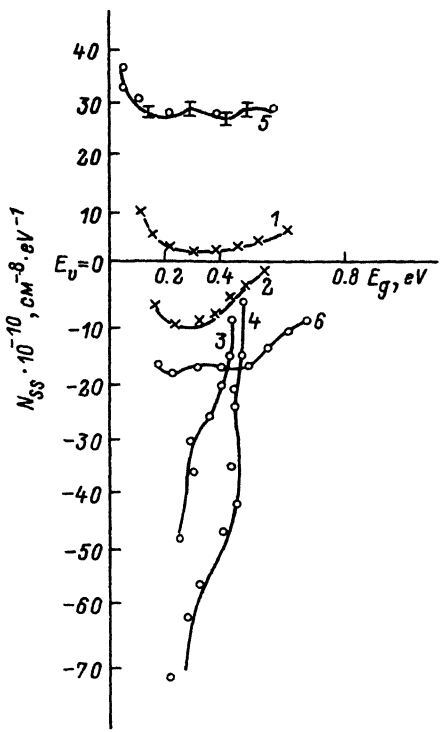


Рис. 2. Энергетический спектр БПЭС МДП структур типа 2. 1, 2 — SiO_2 , SiO_{2B} , 3 — ФСС с PCl_3 4%, 4 — ФСС с PCl_3 8% — до термоотжига. 1'—4' — после термоотжига в различных средах.

В МДП структурах первого типа отличительной особенностью БПЭС является то, что все они имеют донорную природу, как и МПЭС аналогичных структур [8]. Минимальную плотность БПЭС $N_{ss} \sim 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ имеют структуры с окислом SiO_{2Cl} , максимальную — $N_{ss} \sim 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ имеют МДП структуры с диэлектриками SiO_2 , SiO_{2n} (рис. 1, кривые 1, 1', 4). Соответственно максимальную однородность энергетического спектра БПЭС имеют структуры с окислом SiO_{2Cl} . Минимальную — МДП структуры с окислами SiO_2 , SiO_{2n} ; у того и другого диэлектрика наблюдается тенденция резкого возрастания плотности БПЭС с глубиной залегания $E_s < 0.3$ эВ. МДП структуры с ФСС, полученным в оптимальных условиях, по своим зарядовым свойствам располагаются в промежутке между окислами SiO и SiO_{2Cl} , а по форме и степени однородности энергетического спектра ФСС ближе к окислу SiO_2 . У того и другого наблюдается тенденция спада плотности БПЭС с глубиной залегания $E_g < 0.3$ эВ (рис. 1, кривые 2—4).

На рис. 2 представлен сравнительный энергетический спектр БПЭС второго типа МДП структур с SiO_2 , SiO_{2B} , ФСС диэлектриками до термоотжига в различных режимах, соответствующих технологии полевого транзистора типа КП-307 [9] (рис. 2, кривые 1—3), и после термоотжига (рис. 2, кривые 1'—3'). Отличительной особенностью данных рис. 2 является то, что все три типа диэлектриков обеспечивают довольно равномерный энергетический спектр БПЭС с хорошей технологической воспроизводимостью от партии к партии при условии оптимальности технологических режимов. Все это, а также тот факт, что последние термические отжиги МДП структур в атмосфере кислорода, азота и боросодержащей среде при $T = 1200\text{—}1400 \text{ К}$ [9] несущественно влияют на однородность энергетического спектра БПЭС (рис. 2, кривые 1—3), указывают на достаточно высокое качество как эпитаксиальных структур, так и объема диэлектриков. Совсем другую картину мы видим при избытке фосфорного диффузанта во время загонки с расходом более 4 ат%. На рис. 2, кривая 4 представлены энергетический спектр БПЭС МДП структур типа 2 с избытком диффузанта,

Рис. 3. Энергетический спектр МПЭС и БПЭС МДП структур типа 3 с окислами SiO_{2n} , SiO . 1—4 — окисел SiO_{2n} . 1—2 — МПЭС, БПЭС — Al-контакт, 3—4 — МПЭС, БПЭС — Au-контакт, 5—6 — МПЭС, БПЭС — SiO окисел и Al-контакт.



из которого следует, что это приводит к появлению нескольких экстремумов в энергетическом спектре, расположенных практически на протяжении всей запрещенной зоны полупроводника с $E < 0.8$ эВ. При этом указанная деградация энергетического спектра необратима. Последующие термические обработки данных структур в условиях сухого—влажного кислорода, а также в азотоборосодержащих средах при $T = 1270\text{—}1470$ К, соответствующих технологическому маршруту полевого транзистора с p - n -переходом [2, 9], полностью не «сглаживают» участки энергетического спектра БПЭС (рис. 2, кривые 4, 4'). Аналогичная обработка МДП структур типа 2 с SiO_2 , SiO_{2B} и диэлектриками из фосфоросиликатного стекла, полученными в оптимальных условиях, либо не изменяет, либо незначительно ухудшает зарядовое состояние поверхности МДП структур (рис. 2, кривые 1—3).

В связи с недостаточно полной изученностью природы МПЭС и БПЭС МДП структур типа 3 [2, 3] на рис. 3, 4 представлены энергетический и частотный спектры этих структур с Al-, Au-металлизацией и низкотемпературными диэлектриками. Как следует из рисунков, отличительной особенностью энергетического спектра ПЭС МДП структур типа 3 является: амфотерность, более высокая неоднородность спектра, существенная зависимость зарядовых свойств поверхности не только от типа металлического электрода, но и способа его формирования.

Амфотерность спектра МДП структур с Al-металлизацией заключается в том, что МПЭС имеет донорную, а БПЭС — акцепторную природу. В то время как

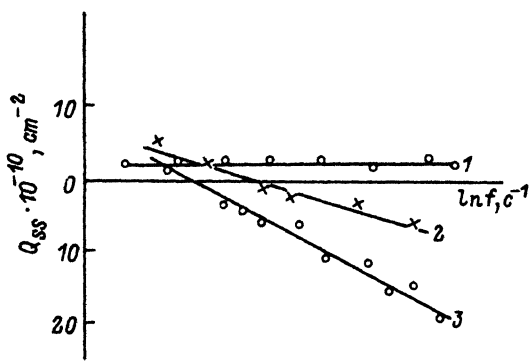


Рис. 4. Зависимость плотности фиксированного заряда от частоты для типа 1 и 3 МДП структур. 1 — тип 1 с окислом SiO_{2C} , 2 — тип 3 с окислом SiO_{2n} и Al-контактом, отожженным в вакууме при $T = 720$ К, 3 — тип 3 с окислом SiO_{2n} и Al-контактом, отожженным в азоте.

данные структуры с Au-контактом МПЭС и БПЭС имеют акцепторную природу с глубиной залегания ПЭС в узких пределах запрещенной зоны полупроводника $E \sim (0.35 \div 0.55)$ эВ (рис. 3, кривые 1—4). Высокая чувствительность параметров МПЭС и БПЭС МДП структур типа 3 с Al-контактом к способу его формирования заключается в том, что крутизна частотной зависимости плотности фиксированного заряда ПЭС (Q_{ss}) зависит от среды и условий отжига контакта после его нанесения (рис. 4, кривые 2—3). Кроме того, параметры МПЭС и БПЭС этих структур существенно зависят от типа диэлектрика (рис. 3, кривые 5, 6).

Анализируя изложенные результаты в рамках существующих моделей и конструктивных аналогов [1—11], мы попытались следующим образом объяснить физическую природу полученных закономерностей. Высокая однородность спектра и зарядовых свойств МДП структур типа 1 с окислом $\text{SiO}_{2\text{Cl}}$ с 2—4 % Cl с полным основанием позволяет отнести их к сравнительно беспримесным структурам, поверхность и граница раздела МДП которых соответствует трехслойной модели реальной поверхности полупроводника [10]. Очевидно, столь высокое качество поверхности этих структур обусловлено высокой однородностью объема полупроводника с $\Delta\rho_v < 10$ % и диэлектрика окислом $\text{SiO}_{2\text{Cl}}$, структурные и поляризационные свойства которого в диапазоне температур (300—450) К близки к свойствам эталонного диэлектрика — объемного кварца [4, 6]. И если это так, то более низкая однородность энергетического спектра БПЭС МДП структур типа 1 с окислами SiO_2 , SiO_{2p} , видимо, связана с недостаточным высоким совершенством и однородностью объема диэлектрика. Доказательством правильности этого предположения служат данные работ [4, 6], где показано, что электрические изоляционные, диэлектрические, поляризационные и структурные параметры окисла SiO_2 в 3—5 раз ниже параметров окисла $\text{SiO}_{2\text{Cl}}$, видимо, за счет доминирующего влияния БПЭС с глубиной залегания $E < 0.3$ эВ (рис. 1, кривые 1, 2). По данным рис. 1, кривые 2, 3 ФСС частично подавляет эти центры с эффективностью, близкой к эффективности хлорной пассивации, но это при условии оптимальности технологии полученных фосфоросиликатных стекол.

Сравнивая данные рис. 1 и 2, можно заключить, что параметры базового полупроводника с $\Delta\rho_v > 10$ % МДП структур типа 2 не оказывают столь существенного влияния на качество поверхности, как параметры диэлектриков. Причем наиболее существенное влияние оказывают именно избыток фосфора при создании ФСС. Этот результат находится в соответствии с данными работы [11], где было показано, что физической причиной аналогичного влияния было появление внешних дислокационных скоплений вокруг областей локальной диффузии фосфора в случае превышения полной концентрации диффузанта оптимальной величины.

Что касается МДП структур типа 3 с Al-, Au-металлизацией, то амфотерность свойств и наличие резко неоднородного спектра ПЭС МДП структур с Au-металлизацией (рис. 3, 4) позволяют предположить, что они больше соответствуют двухслойной радиационно-дефектной модели реальной поверхности полупроводника, чем трехслойной модели [1, 10].

Согласно этой модели, допускающей амфотерность и неоднородность энергетического спектра ПЭС, основное влияние на зарядовые свойства поверхности оказывают не элементарные (точечные), а более протяженные макродефекты, вызывающие появление случайных полей на поверхности и границе раздела ДП в МДП структурах. Подобные макродефекты типа поверхностных микроплазм наблюдались авторами работ [1, 3]. Последние находятся в соответствии с известной моделью КМЛ, согласно которой они образуют случайные поля локальных p — n -переходов в объеме в виде протяженных диполей [2]. Исходя из этого, акцепторная природа БПЭС МДП структур типа 3 с Al-металлизацией, очевидно, связана с доминирующим влиянием на энергетический спектр БПЭС исходной неоднородности полупроводника, в то время как на спектр МПЭС донорной

природы это влияние не столь существенно. В аналогичных структурах с Au-металлизацией доминирующее влияние МПЭС и БПЭС, видимо, оказывает Au-контакт. Это предположение находится в соответствии с данными работ [1, 3, 10, 11], согласно которым золото, имея сравнительно низкую температуру эвтектики с кремнием и высокую подвижность при диффузии по дислокациям, связанным со структурными неоднородностями, способно в процессе термоотжига проникать к границе раздела ДП, создавая на поверхности типичные для него комплексы силицида золота акцепторной природы или дислокации несоответствия в связи с большим ионным радиусом.

Таким образом, доминирующее влияние на однородность спектра ПЭС в кремниевых МДП структурах с окисными диэлектриками может оказывать как полупроводник с разбросом удельного сопротивления выше 50 %, так и диэлектрик, структурная неоднородность которого, например, в 3—5 раз выше структурной неоднородности термического окисла, выращенного в оптимальных условиях хлорсодержащей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. П. Горбань, В. Г. Литовченко. Основы физики микроэлектронных систем МДП, 321. Киев (1978).
- [2] С. А. Азимов, Р. А. Муминов, А. Я. Яфасов. Динамические характеристики неоднородных полупроводниковых структур, 58. Ташкент (1975).
- [3] Р. О. Литвинов. Влияние поверхности на характеристики полупроводниковых приборов. 119. Киев (1972).
- [4] С. С. Суркова, В. Т. Малаева, Е. Г. Заугольникова, Н. Г. Кадырова. Влияние хлора на пассивирующие и диэлектрические свойства двуокиси кремния. Электрон. техника, вып. 9, 97 (1977).
- [5] Е. З. Мазель, Ф. П. Пресс. Планарная технология кремниевых приборов, 217. М. (1979).
- [6] В. Т. Малаева, Р. А. Муминова, Ф. Г. Муллагалиева, А. Я. Яфасов. Диэлектрические покрытия для низкотемпературной пассивации полупроводниковых детекторов. Фотоэлектрические и кинетические явления в неоднородных полупроводниках и полупроводниковых пленках, 36. Ташкент (1982).
- [7] Колешко, Г. Д. Каплан, С—V-методы измерения параметров МДП структур, 67. Минск (1977).
- [8] Ф. В. Ржанов, Т. Е. Ковалевская, И. Г. Неизвестный. Свойства структур металл—диэлектрик—полупроводник, 467. М. (1978).
- [9] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов, 450. М. (1984).
- [10] В. Г. Литовченко. Основы физики полупроводниковых слоистых систем, 282. Киев (1980).
- [11] К. Л. Енишерлова, В. А. Курмачев, Л. М. Моргулис. Исследование влияния дислокационных скоплений вокруг областей локальной диффузии фосфора на параметры мощных кремниевых транзисторов. Электрон. техн., вып. 1, 9 (1981).

Редактор Ю. Б. Лянда-Геллер