

ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНО-ТОНКИХ МДП СТРУКТУР КРЕМНИЙ—ФТОРИД КАЛЬЦИЯ—ЗОЛОТО, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

Х. К. Альварес, Л. С. Берман, В. А. Борович, И. В. Грехов,
И. Н. Каримов, Н. С. Соколов, А. Ф. Шулекин

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получено 11 июня 1993 г. Принято к печати 17 июня 1993 г.)

Фториды щелочноземельных элементов (CaF_2 , SrF_2 и BaF_2) являются перспективными диэлектриками для различных приборов полупроводниковой электроники [1]. Имеется ряд работ по исследованию свойств МДП структур на основе фторидов на Si и GaAs [2-6]. Однако свойства МДП структур с туннельно-тонкими слоями этих диэлектриков практически не изучались. В настоящей работе исследованы вольт-фарадные характеристики МДП структур $n\text{-Si-CaF}_2\text{-Au}$ с туннельно-тонким диэлектриком, изготовленных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Для изготовления образцов использовались пластины кремния марки КЭФ-1 ориентации (111).

Омический контакт к базе создавался диффузией фосфора. На n -область напылялся Al. Монокристаллические слои CaF_2 выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии [7]. Первые 1÷2 монослоя CaF_2 выращивались при 770 °С, рост остальной части пленки выполнялся при 300 °С. На CaF_2 наносилось золото напылением в вакууме через маску ($T < 100$ °С). Были изготовлены 4 группы образцов с различной толщиной (Δ) CaF_2 : группа 1 — $\Delta = 170$, группа 2 — $\Delta = 54$, группа 3 — $\Delta = 43$, группа 4 — $\Delta = 25$ Å.

Для контроля чистоты исходного кремния из той же пластины были изготовлены диоды Шоттки путем напыления золота. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) измерялись на установке, описанной в [8].

Результаты измерений и их обсуждение

Концентрация фосфора контролировалась по характеристике $C^{-2}(V)$ диодов Шоттки и составляла $N_p = 0.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрация остаточных глубоких центров (ГЦ) определялась в диодах Шоттки методом DLTS и составляла $N_{DC} < 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Для всех МДП структур на ВФХ наблюдалась петля гистерезиса, причем гистерезис зависит от направления и скорости прохождения интервала напряжений и от начального заполнения ГЦ. На рис. 1 и 2 приведены ВФХ при

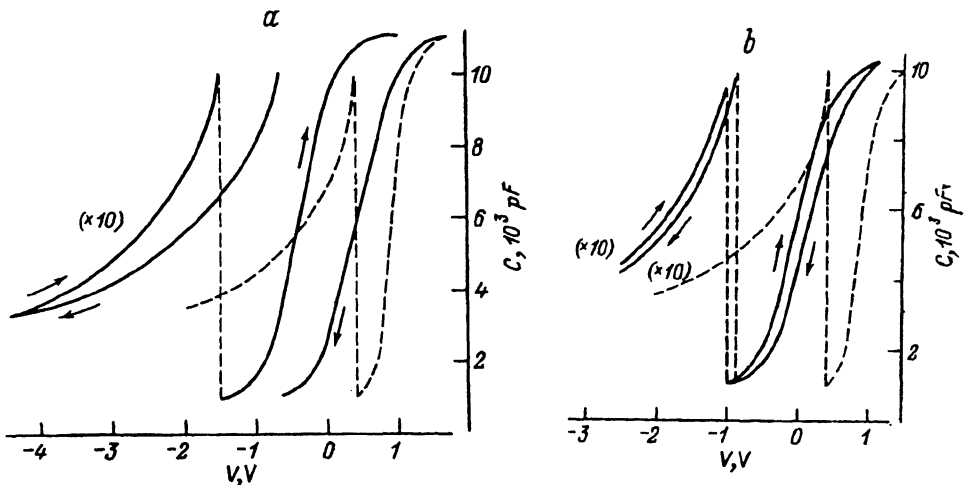


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики образца группы 1 (сплошные линии): *a* — выдержка при $V=0$, $t=24$ ч, изменение напряжения от обогащения к обеднению и после паузы $t=630$ с — обратно; *b* — выдержка при $V=-4.5$ В, $t=24$ ч, изменение напряжения от обеднения к обогащению и после паузы $t=630$ с — обратно. Штриховые линии — расчетные вольт-фарадные характеристики.

$T=300$ К и $dV/dt=6.3$ мВ/с для двух способов измерения (все ВФХ построены с автоматическим выбором масштаба по емкости).

(i). После длительной выдержки при $V=0$ и изменении напряжения от обогащения к обеднению и обратно ВФХ смещаются в сторону отрицательных напряжений (рис. 1, *a*, 2, *a*), что обусловлено увеличением положительного заряда на границе раздела Si—CaF₂ и (или) в объеме CaF₂ вследствие преобладания термоэмиссии электронов с ГЦ над захватом электронов (дрейф ионов привел бы к смещению ВФХ в противоположном направлении). Сдвиг ВФХ приводит к сдвигу напряжения плоских зон V_{FB} . Так, для образца

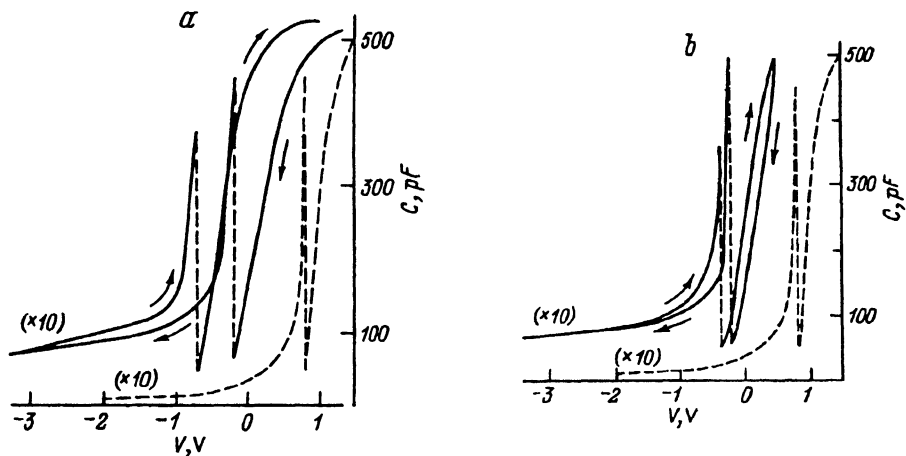


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики образца группы 4 (сплошные линии): *a* — режим измерений тот же, что и для рис. 1, *a*; *b* — выдержка при $V=-3.5$ В, $t=24$ ч, изменение напряжения от обеднения к обогащению и после паузы $t=630$ с — обратно. Штриховые линии — расчетные вольт-фарадные характеристики.

группы 4 V_{FB} изменилось от 0.3 В (при движении в сторону обеднения) до -0.2 В (при движении в сторону обогащения).

(ii). После длительной выдержки при обеднении [$V = -(3.5 \div 4.5)$ В] и изменении напряжения от обеднения к обогащению и обратно ВФХ смещаются в сторону положительных напряжений (рис. 1, *b*, 2, *b*), что обусловлено увеличением отрицательного заряда вследствие преобладания захвата электронов на ГЦ над их термоэмиссией.

Наличие петли гистерезиса показывает, что в режимах (i) и (ii) для части ГЦ постоянные времени захвата и термоэмиссии имеют величину порядка времени прохождения интервала напряжений и больше. Такие большие постоянные времени характерны для ГЦ, расположенных в объеме диэлектрика. Согласно современным представлениям [9, 10], гистерезис ВФХ и частотная зависимость емкости МДП структур обусловлены захватом носителей дефектами разупорядочения границы раздела диэлектрик—полупроводник и термоэмиссией с них. Эти дефекты распределены по глубине диэлектрика, они создают сплошной спектр энергетических уровней с широким интервалом постоянных времени. Одной из возможных причин образования таких дефектов в наших образцах является относительно низкая температура роста слоя фторида кальция (300 °С), при которой из термодинамических соображений естественно ожидать наличия значительной концентрации дефектов структуры (например, вакансий фтора и их скоплений), которые, как известно, могут захватывать электроны с образованием различных центров [11]. Сдвиг ВФХ в режиме I больше, чем в режиме II, т. е. скорость термоэмиссии электронов с ГЦ при обеднении превышает скорость их захвата на ГЦ при обогащении. По-видимому, такое соотношение обусловлено сильным электрическим полем при обеднении, ускоряющим туннелирование электронов с ГЦ в диэлектрике. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Увеличение скорости изменения напряжения приводит к сужению петли гистерезиса: так, при $dV/dt = 0.76$ мВ/с для способа (i) петля сужается в 3÷5 раз, а для способа (ii) — практически отсутствует.

Ни в одной из групп образцов не образуется инверсионного слоя, хотя толщины CaF_2 170 Å достаточно для исключения сквозного туннелирования. Это позволяет предположить, что туннелирование происходит через ГЦ в CaF_2 .

Выводы

В объеме фторида кальция имеются медленно перезаряжающиеся глубокие центры, являющиеся причиной петли гистерезиса вольт-фарадных характеристик. Скорость термоэмиссии электронов с этих глубоких центров при обеднении превышает скорость захвата электронов на глубокие центры при обогащении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] L. J. Schowalter, R. W. Farhauer. J. Vac. Sci. Technol., A4, 1026 (1986).
- [2] V. V. Afanas'ev, S. V. Novikov, N. S. Sokolov, N. L. Yakovlev, Microelectronic Engineering, 15, 139 (1991).
- [3] S. Lanyi, S. V. Novikov, N. S. Sokolov, N. L. Yakovlev. Thin Sol. Films., 204, 133 (1991).
- [4] P. G. McMullin, S. Sinharoy. J. Vac. Sci. Technol., A6, 1367 (1988).
- [5] T. Waho, H. Saeki. Jap. J. Appl. Phys., 30, 221 (1991).
- [6] T. P. Smith, J. M. Phillips, W. M. Augustiniak, P. J. Stiles. Appl. Phys. Lett., 45, 907 (1984).
- [7] С. В. Гастев, С. В. Новиков, Н. С. Соколов, Н. Л. Яковлев. Письма ЖЭТФ, 13, 961 (1987).
- [8] Л. С. Берман, А. Д. Ременюк, М. Г. Толстобров. Универсальная измерительная установка для емкостной спектроскопии полупроводников, автоматизированная на основе цифровой техники. ФТИ, Препринт. № 974 (1985).

- [9] L. He, H. Hasegawa, T. Sawada, H. Ohno. *Jap. J. Appl. Phys.*, 27, 512 (1988).
[10] L. He, H. Hasegawa, T. Sawada, H. Ohno. *J. Appl. Phys.*, 63, 2120 (1988).
[11] W. Hayes, A. M. Stoneham, in: *Crystals with fluorite structure*. Ed. W. Hayes. ch. 4. Clarendon. Oxford (1974).

Редактор Л. В. Шаронова
