

06.2;06.3

## Кремниевые металл–диэлектрик–полупроводник-варикапы с диэлектриком из оксида иттербия

© В.А. Рожков, А.Ю. Трусова

Самарский государственный университет

Поступило в Редакцию 10 октября 1996 г.

Исследованы электрофизические свойства кремниевых металл–диэлектрик–полупроводник-варикапов с диэлектриком из оксида иттербия, полученного методом резистивного вакуумного распыления редкоземельного металла с последующим термическим окислением пленки на воздухе при температуре 500–500°С.

Установлено, что электропроводность образцов описывается законом Пула–Френкеля. Методом высокочастотных вольт-емкостных характеристик определены удельная емкость диэлектрика  $C_0 = 0.027–0.03$  мкФ/см<sup>2</sup>, крутизна вольт-емкостной характеристики  $dC/dV = 35–40$  пФ/В, фиксированный заряд в диэлектрике  $Q_{\Phi} = (1.7–2.7) \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>, плотность поверхностных состояний при потенциале плоских зон  $N_{ss} = (1–2) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> · эВ<sup>-1</sup>. Установлено, что коэффициент перекрытия емкости в металл–диэлектрик–полупроводник-варикапах составлял 2.5–3.

Показана перспективность использования исследованных структур в качестве металл–диэлектрик–полупроводник-варикапов с малыми управляющими напряжениями и высокой добротностью.

Исследованы электрофизические свойства кремниевых металл–диэлектрик–полупроводник-варикапов с диэлектриком из оксида иттербия, полученного методом резистивного вакуумного распыления редкоземельного металла с последующим термическим окислением пленки на воздухе при температуре 500–550°С.

Установлено, что электропроводность образцов описывается законом Пула–Френкеля. Методом высокочастотных вольт-емкостных характеристик определены удельная емкость диэлектрика  $C_0 = 0.027–0.03$  мкФ/см<sup>2</sup>, крутизна вольт-емкостной характеристики

$\frac{1}{C} \frac{dC}{dV} = 0.4-0.44 \text{ В}^{-1}$ , фиксированный заряд в диэлектрике  $Q_{\Phi} = (1.7-2.7) \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ , плотность поверхностных состояний при потенциале плоских зон  $N_{ss} = (1-2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ . Установлено, что коэффициент перекрытия емкости в металл–диэлектрик–полупроводник-варикапах составлял 2.5–3.

Показана перспективность использования исследованных структур в качестве металл–диэлектрик–полупроводник-варикапов и фотоварикапов.

Нелинейные металл–диэлектрик–полупроводник-кондесаторы (варикапы), широко используемые в радиотехнических и оптоэлектронных устройствах, характеризуются высокой добротностью и большими значениями коэффициента перекрытия емкости и входного сопротивления. Для достижения значительных величин перекрытия емкости и крутизны вольт-емкостной характеристики в металл–диэлектрик–полупроводник-приборах необходимо использовать диэлектрические материалы с высокими значениями диэлектрической проницаемости, к числу которых относятся оксиды редкоземельных элементов [1–3]. Многообразие электрофизических свойств этих материалов в сочетании с их функциональными особенностями позволило создать на основе оксидов редкоземельных элементов эффективные просветляющие покрытия для кремниевых фотоэлектрических приборов [4], электрические переключатели и элементы памяти [5], металл–диэлектрик–полупроводник-варикапы и фотоварикапы [6,7].

В настоящей работе исследуются электрофизические свойства кремниевых металл–диэлектрик–полупроводник-структур с диэлектрической пленкой из оксида иттербия и возможность их использования в качестве варикапов и фотоварикапов.

Образцы для исследования изготавливались на монокристаллических кремниевых подложках марки КЭФ-5 и КДБ-4,5 с ориентацией (111) и (100) соответственно. Кремниевые пластины обезжиривались с помощью ультразвуковой мойки в ацетоне. Для снятия слоя естественного оксида подложки обрабатывались в слабом растворе плавиковой кислоты. Пленки оксида иттербия получались методом термического окисления на воздухе при температуре 500–550°C в течение 30 мин слоя редкоземельных элементов, нанесенного на поверхность кремниевой подложки. Пленка иттербия на поверхности кремния изготавливалась методом термического резистивного распыления из молибденовой лодочки в вакууме  $10^5$  Тор на установке типа ВУП-5. Электроды к слою

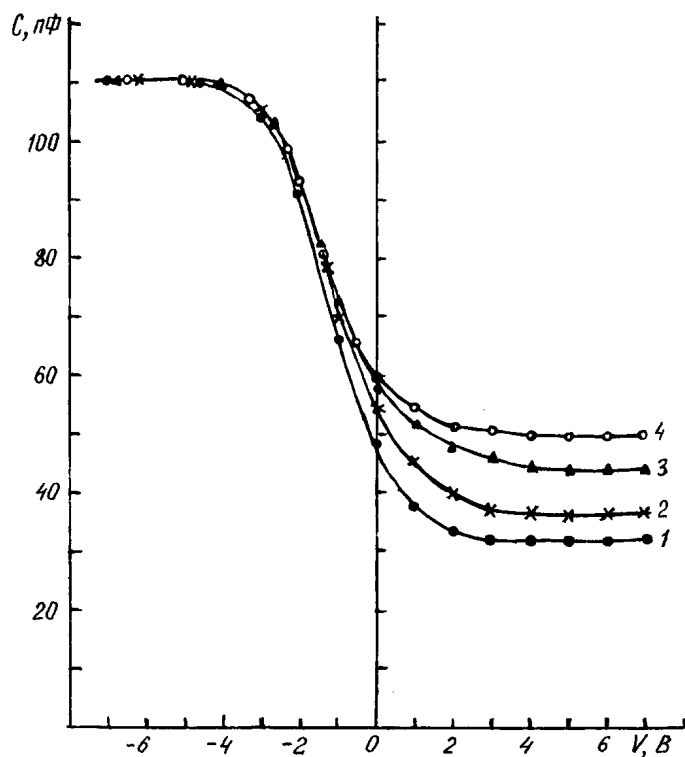
оксида иттербия площадью  $0.39 \text{ мм}^2$  наносились путем термического распыления в вакууме пленки алюминия через трафарет. С противоположной стороны на шлифованную поверхность кремниевой подложки напылялся сплошной контакт из алюминия.

Толщина пленки оксида редкоземельных элементов в металл-диэлектрик-полупроводник структуре Al-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si составляла 0.3 мкм.

Вольт-емкостные характеристики, зависимости проводимости  $G$  тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  от приложенного напряжения измерялись на частоте 1 МГц с помощью цифрового  $L, C, R$  измерителя типа E7-12. Освещение образцов проводилось излучением от лампы накаливания с вольфрамовой нитью мощности 150 Вт. Исследования вольт-амперных характеристик проводились на постоянном токе с использованием электрометрического вольтметра ЭД-05 М.

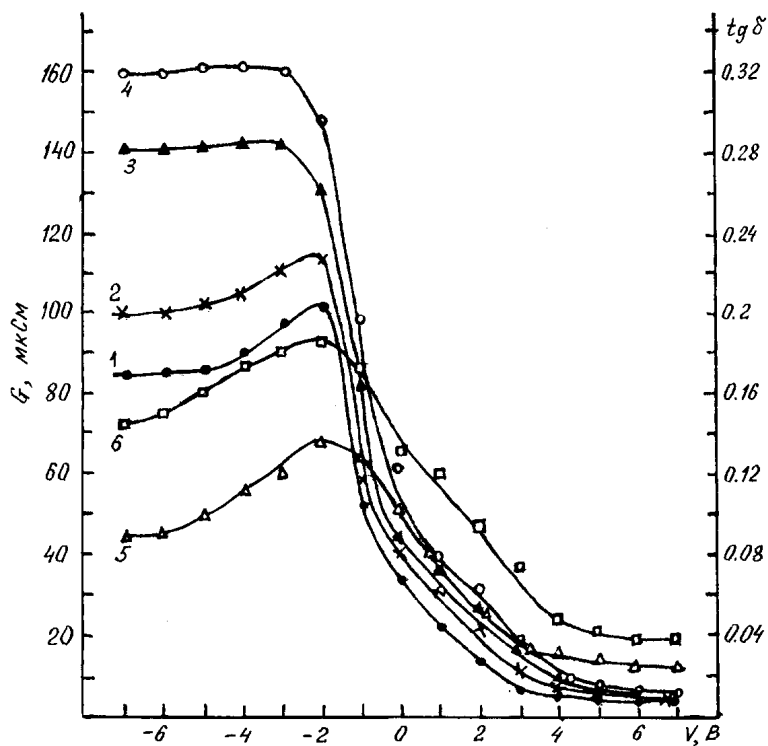
На рис. 1 представлены типичные вольт-фарадные характеристики металл-диэлектрик-полупроводник-конденсаторов в темноте и при различных уровнях освещенности. Эти зависимости имеют типичный высокочастотный вид и не проявляют гистерезисных явлений. Область управляющих напряжений, соответствующая изменению емкости металл-диэлектрик-полупроводник-систем, лежит в пределах от  $-3$  до  $+2$  В. Экспериментальные вольт-фарадные характеристики имели незначительное смещение в сторону отрицательных значений напряжения относительно теоретически рассчитанных  $C-V$  зависимостей идеальных металл-диэлектрик-полупроводник-структур. Это свидетельствует о наличии малого положительного фиксированного заряда в диэлектрике.

Коэффициент перекрытия емкости  $K = C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$  в темноте при изменении питающего напряжения составлял для различных образцов 2.5–3. Определенные из вольт-емкостных характеристик параметры исследуемых металл-диэлектрик-полупроводник-систем имеют следующие значения: удельная емкость диэлектрика  $C = 0.027-0.03 \text{ мкФ/см}^2$ , фиксированный заряд в диэлектрике  $Q_{\text{ф}} = (1.7-2.7) \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ , плотность поверхностных состояний при потенциале плоских зон  $N_{\text{ss}} = (1-2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ , крутизна вольт-емкостной характеристики при потенциале плоских зон  $\frac{1}{C} \frac{dC}{dV} = 0.4-0.44 \text{ В}^{-1}$ . Освещение образцов светом приводило к возрастанию величины емкости в 1.5 раза в области напряжений, соответствующих инверсии поверхности полупроводника. Данный результат обусловлен в основном фотогенерацией неосновных носителей заряда в приповерхностной области кремния.



**Рис. 1.** Вольт-емкостные характеристики металл–диэлектрик–полупроводник-структур  $\text{Al-Yb}_2\text{O}_3\text{-Si}$  с кремнием  $p$ -типа проводимости в темноте (1) и при различной освещенности: 450 (2), 2400 (3), 6500 лк (4);  $d = 0.3$  мкм.

Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  и проводимости  $G$  от напряжения при частоте измерительного сигнала 1 МГц в темноте и при различных уровнях освещенности приведены на рис. 2. Характерными для этих зависимостей являются наличие максимума при напряжении плоских зон и тенденции к насыщению значений  $\text{tg } \delta$  и  $G$  в области напряжений, соответствующих аккумуляции и инверсии поверхности полупроводника. Значения  $\text{tg } \delta$  в темноте при различных напряжениях лежали в пределах от 0.03 до 0.18 и существенно не изме-



**Рис. 2.** Зависимости  $G$  (1–4) и  $\operatorname{tg} \delta$  (5, 6) от напряжения в темноте (1, 5) и при различных освещенностях: 450 (2), 2400 (3), 6500 лк (4, 6).

нялись при освещении. Активная составляющая проводимости металл–диэлектрик–полупроводник–структур также зависела от освещения.

Вольт-амперные характеристики, построенные в координатах  $\lg I$  от  $V^{1/2}$ , прямолинейны и описываются законом Пула–Френкеля. Коэффициент выпрямления структур лежал в пределах 1.1–1.5. Величины удельного сопротивления пленок оксида иттербия, рассчитанные из вольт-амперных характеристик, составляют  $10^{14}$ – $10^{15}$  Ом·см.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования исследованных структур в качестве стабильных металл–диэлектрик–полупроводник–варикапов и фотоварикапов.

## Список литературы

- [1] *Вдовин О.С., Кирьяшкина З.И., Котелков В.Н., Новичков В.В., Рожков В.А.* Пленки оксидов редкоземельных элементов в МДМ- и МДП-структурах. Саратов: СГУ, 1983. 159 с.
- [2] *Латухина Н.В., Рожков В.А., Романенко Н.Н.* // Микроэлектроника. 1994. Т. 23. № 1. С. 59–64.
- [3] *Rozhkov V.A., Goncharov V.P., Trusova A.Yu.* // IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. Leicester. England. 1995. P. 552–555.
- [4] *Аношин Ю.А., Петров А.И., Рожков В.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 10. С. 54–58.
- [5] *Рожков В.А., Петров А.И.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 1. С. 49–52.
- [6] *Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г.* и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 8. С. 183–186.
- [7] *Рожков В.А., Гончаров В.П., Трусова А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 2. С. 6–10.