

06:07

Переключающие кремниевые структуры с фторидами редкоземельных элементов

© В.А. Рожков, М.Б. Шалимова

Самарский государственный университет

Поступило в Редакцию 6 марта 1998 г.

Представлены результаты исследования фотоэлектрических характеристик кремниевых переключающих структур металл–диэлектрик–полупроводник с тонкопленочным диэлектрическим слоем из фторида редкоземельного элемента. Исследованием стационарных и кинетических характеристик фототока показано, что в состоянии с низким сопротивлением к структурам применима модель металл–туннельный диэлектрик–полупроводник.

Основные закономерности явления электрического переключения проводимости с памятью, обнаруженного в пленочных структурах с фторидами редкоземельных элементов (РЗЭ), описаны в работах [1–3]. Характерными особенностями для этого эффекта является большая кратность изменения сопротивления в высокоомном и низкоомном состоянии (10^6 – 10^7), малые времена (доли μs) и энергии ($\sim 10^{-8}$ J) переключения. Как показывают исследования [2,3], в низкоомном состоянии в пленке диэлектрика формируется канал радиусом 1–5 μm , с повышенной электропроводностью и положительным температурным коэффициентом сопротивления, что характерно для металлической фазы. В данной работе описываются фотоэлектрические свойства переключающих кремниевых структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) с фторидами редкоземельных элементов.

Диэлектрические пленки фторидов церия, диспрозия, эрбия получались методом термического распыления порошкообразных фторидов РЗЭ в вакууме. Подложками для МДП-структур служили пластины монокристаллического кремния *n*- или *p*-типа проводимости марки КЭФ-5 (111) или КДБ-4,5 (100) соответственно. Фотоэлектрические характеристики кремниевых МДП-структур с фторидами РЗЭ исследовались как в режиме стационарной подсветки, так и при освещении структур импульсами монохроматического излучения различной длительности. Для измерений использовались структуры с верхними алю-

минируемыми контактами площадью $A = 2.45 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$. Интенсивность падающего излучения составляла $I = 4.8 \cdot 10^{15} \div 4.8 \cdot 10^{18} \text{ quon./cm}^2 \cdot \text{s}$ на длине волны $\lambda = 0.63 \text{ }\mu\text{m}$. В качестве источника импульсного монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 0.93 \text{ }\mu\text{m}$ использовался арсенид-галлиевый светодиод АЛ 106А.

Установлено, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) МДП-структур в высокоомном состоянии практически симметричны и описываются механизмом Пула-Френкеля. После переключения в низкоомное состояние ВАХ МДП-структур униполярны с коэффициентом выпрямления $10-10^4$. Как показывает анализ, униполярность ВАХ структур в низкоомном состоянии объясняется свойствами границы раздела низкоомный канал проводимости-полупроводник. При этом наблюдаемый для различных образцов разброс величин прямого и обратного токов и значения коэффициента выпрямления объясняется присутствием слоя туннельно-тонкого диэлектрика на границе с полупроводником. Данный слой формируется в области канала проводимости малого радиуса после переключения МДП-структур в низкоомное состояние; толщина его, согласно проведенным оценкам, составляет $10 \div 40 \text{ \AA}$.

Исследования показали, что фотоэлектрические характеристики МДП-структур значительно изменяются после переключения в низкоомное состояние. Установлено, что в состоянии с высоким сопротивлением, когда ток утечки через диэлектрик мал, величина стационарного фототока, протекающего через МДП-структуру, также незначительна. В рассматриваемом случае кинетика фотоответа МДП-структур знакопеременная и характеризуется начальным и конечным всплеском тока чисто емкостного характера.

После переключения МДП-структур в состояние с низким сопротивлением их фотоэлектрические характеристики значительно изменяются и становятся подобными зависимостям, характерным для структур металл-туннельно тонкий диэлектрик-полупроводник (МТДП). На рис. 1 представлены обратные ветви ВАХ МДП-структур Al-CeF₃-Si в низкоомном состоянии, измеренные в режиме малого сопротивления нагрузки при стационарной подсветке. Как видно из рисунка, на начальном участке при $V < V^{kp}$ измеренный фототок незначителен и ограничивается током утечки через диэлектрик. При $V > V^{kp}$ фототок насыщается, при этом приложенное напряжение падает на области пространственного заряда (ОПЗ). Проведенные оценки показывают, что изменение величины V^{kp} обусловлено в основном изменением падения напряжения на диэлектрике, которое составляло $V_d \approx 1.5 \div 12.2 \text{ V}$.

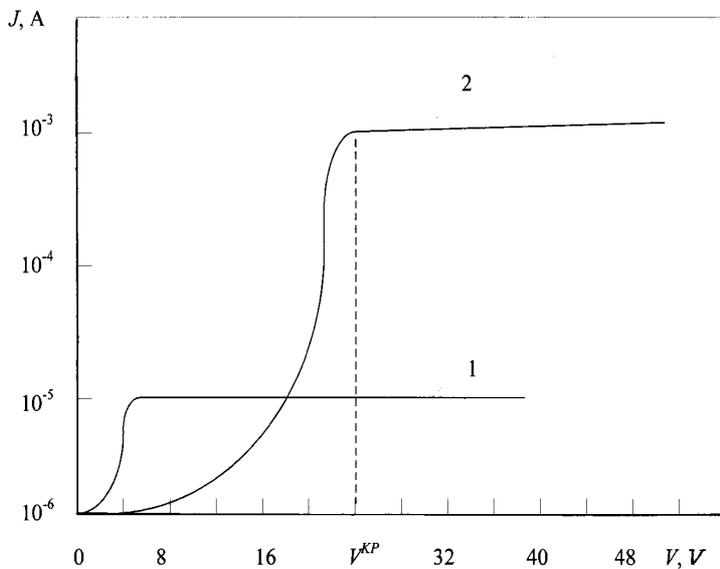


Рис. 1.

Таким образом, в условиях эксперимента реализуется ситуация, когда значительная часть напряжения, приложенного к структуре МТДП, падает в диэлектрике, при этом может быть реализован режим усиления фототока. Для этого случая характерным является рост тока основных носителей заряда, туннелирующих из металла в полупроводник по мере увеличения обратного смещения интенсивности освещения. Фототок основных носителей становится сравнимым или больше тока неосновных носителей, что означает режим усиления [4–5].

Кинетические характеристики фототока в низкоомном состоянии при приложении к структуре обратного смещения $V = -32\text{ V}$ хорошо аппроксимируются гиперболическими зависимостями следующего вида:

$$j_p(t) = I^* M_p \begin{cases} 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{\tau_d}\right)^2} \\ \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{\tau_d}\right)^2} \end{cases}, \quad (1)$$

где первое уравнение соответствует включению освещения в момент $t = 0$, а второе — выключению освещения в момент $t = 0$;

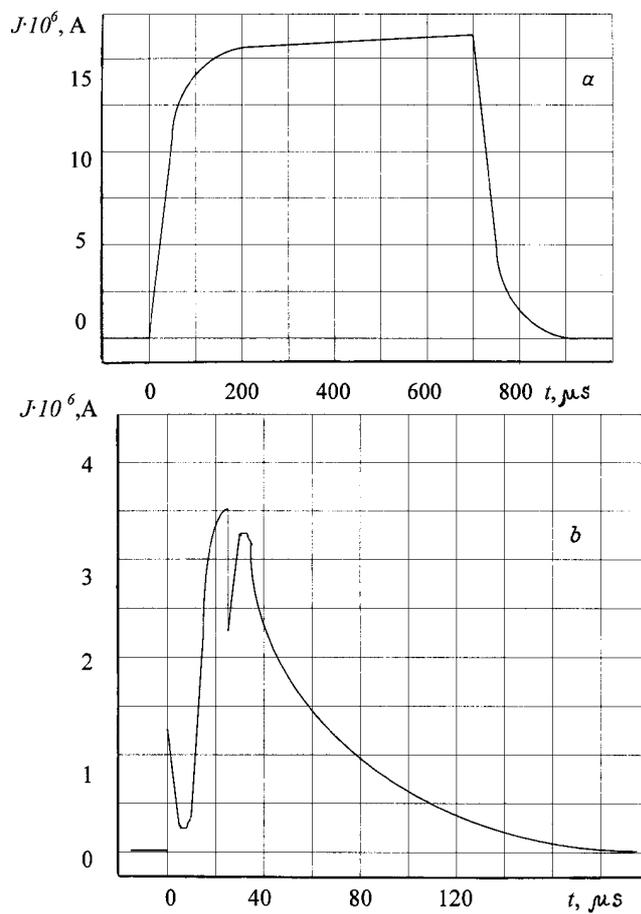


Рис. 2.

$M_p = (J_n + J_p)/J_p$ — коэффициент усиления фототока для структур с подложкой n -типа; I^* — поток электронно-дырочных пар, генерированных светом в единицу времени; τ_d — характерное время релаксации, J_n и J_p — фототок основных носителей (электронов) и неосновных носителей (дырок) соответственно.

При исследовании кинетических характеристик фототока на осциллограммах фотоответа можно выделить участки емкостного тока при выключении и включении освещения. На рис. 2, *a* представлена полная осциллограмма фототока структуры Al-CeF₃-*p*Si в низкоомном состоянии при освещении прямоугольным импульсом света, когда к структуре приложено постоянное напряжение $V = -32$ V. На рис. 2, *b* представлена эта же характеристика при меньших временах длительности импульса освещения, что дает возможность более детально рассмотреть начальный и конечный всплеск тока чисто емкостного характера. Данный ток определяется выражением $J_p(0) = q \cdot A \cdot I^* = 1.3 \mu\text{A}$ и равняется току фотогенерации неосновных носителей заряда. Он устанавливается за время, существенно меньшее τ_d , и определяется бóльшим из величин времени пролета носителей через ОПЗ или RC. Величина фототока насыщения превосходит значение $J_p(0)$, что означает реализацию режима усиления фототока [6]. Максимальное значение коэффициента усиления фототока составило $M = 49$ и $M_p = 34$ для структур на основе кремния *p*- и *n*-типа проводимости соответственно. Определенные из кинетических характеристик значения коэффициентов туннельной прозрачности диэлектрического слоя лежали в пределах $\bar{D}_n = 2.7 \cdot 10^{-11} \div 2.2 \cdot 10^{-8}$; $\bar{D}_p = 1.7 \cdot 10^{-10} \div 4.7 \cdot 10^{-8}$.

Таким образом, проведенные исследования показывают перспективность использования кремниевых МДП-структур с фторидами РЗЭ в качестве электрических переключателей и фотоприемников, обладающих внутренним усилением фототока.

Список литературы

- [1] Рожков В.А., Шалимова М.Б. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 5. С. 74–77.
- [2] Рожков В.А., Шалимова М.Б. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 3. С. 438–445.
- [3] Рожков В.А., Романенко Н.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 22. С. 6–9.
- [4] Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 1. С. 142–148.
- [5] Вуль А.Я., Федоров В.И., Бирюлин Ю.Ф. и др. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 3. С. 525–531.
- [6] Вуль А.Я., Дидейкин А.Т., Зинчик Ю.С. и др. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1471–1477.