

# Фотоэлектрические явления в переключающих кремниевых структурах с фторидами редкоземельных элементов

© В.А. Рожков, М.Б. Шалимова

Самарский государственный университет,  
443011 Самара, Россия

(Получена 12 октября 1998 г. Принята к печати 8 декабря 1998 г.)

Представлены результаты исследования фотоэлектрических характеристик кремниевых переключающих структур металл–диэлектрик–полупроводник, где в качестве диэлектрика используются фториды церия, диспрозия или эрбия. Показано, что в состоянии с низким сопротивлением их фотоэлектрические характеристики аналогичны характеристикам структуры металл–(туннельный диэлектрик)–полупроводник, в частности реализуется механизм инжекционного усиления фототока.

## Введение

Явление электрического переключения проводимости с памятью, обнаруженное сравнительно недавно [1–3] в структурах с пленочными фторидами редкоземельных элементов (РЗЭ), открывает новые пути создания различного рода переключателей, элементов репрограммируемой памяти, управляющих и других функциональных устройств. Характерными для этого эффекта в структурах с фторидами РЗЭ являются большой диапазон изменения сопротивления в высокоомном и низкоомном состояниях (до  $10^6$ – $10^7$  раз), малые времена (доли мкс) и энергии ( $\sim 10^{-8}$  Дж) переключения, высокая радиационная стойкость, практически неограниченное число циклов переключения при оптимальном выборе режима переключения. Это обуславливает необходимость исследования основных свойств эффекта переключения проводимости с памятью в этих структурах, характеристик высокоомного и низкоомного состояний. В этой связи в данной работе исследованы особенности фотоэлектрических явлений в кремниевых переключающих структурах с диэлектрическими слоями из фторидов РЗЭ.

## Объекты и процедура исследований

Для экспериментальных исследований изготавливались образцы со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Диэлектрические пленки фторидов РЗЭ толщиной  $\sim 0.25 \div 0.45$  мкм получались методом термического распыления порошкообразных  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{DyF}_3$ ,  $\text{ErF}_3$  в вакууме. Подложки 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 алюминиевыми контактами площадью  $A = 2.45 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>. Облучение структур производилось лазером ЛГН-215 с длиной волны  $\lambda = 0.63$  мкм и

площадью поперечного сечения пучка  $2.54 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>. Интенсивность падающего излучения изменялась с помощью дополнительных светофильтров и составляла  $I = 7.6 \cdot 10^{16} \div 4.8 \cdot 10^{18}$  кВт/(см<sup>2</sup> · с). В качестве источника импульсного монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda = 0.93$  мкм использовался арсенид-галлиевый светодиод типа АЛ-106А. Интенсивность излучения светодиода АЛ-106А на длине волны излучения  $\lambda = 0.93$  мкм определялась калиброванным фотодиодом ЛФД-2-А и составляла  $I = 3 \cdot 10^{17}$  кВт/(см<sup>2</sup> · с). Также использовалась лампа накаливания с вольфрамовой нитью мощностью 40 Вт.

На рис. 1 представлены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) переключения для исследованных структур металл–диэлектрик–полупроводник, изготовленных на кремниевых подложках *n*-типа проводимо-

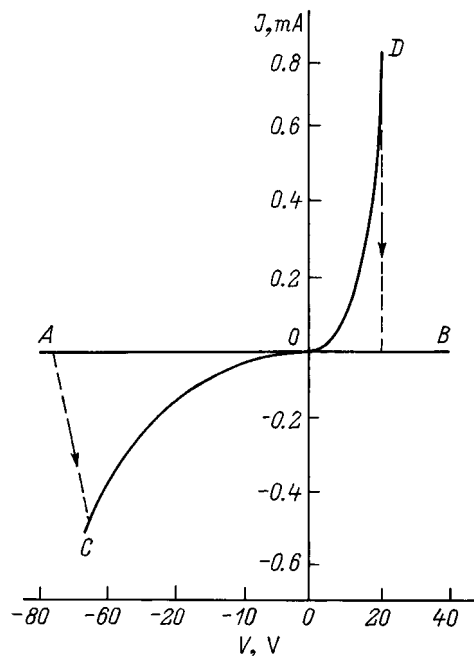


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики кремниевой МДП структуры с фторидом редкоземельного элемента: AOB — высокоомное состояние; COD — низкоомное состояние.

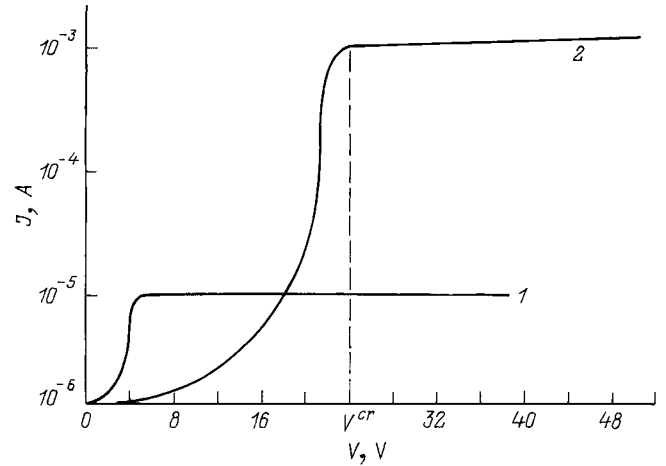
сти. Как показали исследования, МДП структуры могут находиться в двух устойчивых состояниях с существенно различными значениями сопротивления и ВАХ. Изготовленные образцы находятся в состоянии с высоким сопротивлением  $(2-4) \cdot 10^{11}$  Ом (рис. 1, прямая  $A0B$ ), пока электрическое напряжение, полярность которого соответствует обеднению поверхности полупроводника основными носителями заряда, не превысит некоторое пороговое значение  $V_{th} = 5 \div 200$  В (в зависимости от толщины диэлектрика и степени его совершенства). При превышении порогового напряжения происходит резкое уменьшение сопротивления образца и переключение его в низкоомное состояние с сопротивлением  $10^4 \div 10^5$  Ом (рис. 1, ветвь  $C0D$ ). Переключение структур в исходное, высокоомное состояние осуществляется при противоположной полярности напряжения, когда величина тока через образец достигает значения  $100 \div 600$  мкА. При этом напряжение обратного переключения для различных образцов лежит в пределах  $V_0 = 3 \div 20$  В. Структуры воспроизводимо и многократно (более  $10^4$  раз) переключаются из одного состояния в другое и обратно как на постоянном, так и при импульсном напряжении, причем оба состояния сохраняются длительное время (более 30 суток) при комнатной температуре и выключенном напряжении.

## Результаты исследований и их обсуждение

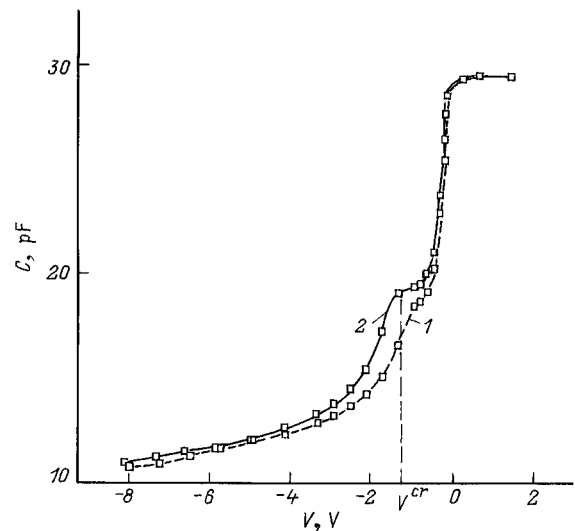
Исследования показали [2], что канал проводимости, формирующийся в пленке фторида РЗЭ в низкоомном состоянии, имеет положительный температурный коэффициент сопротивления, а также низкое удельное сопротивление, характерное для металлов. Это дает основание предположить, что проводящий канал в основном состоит из металлической фазы. Оценки радиуса канала проводимости по величине сопротивления растекания кремниевой подложки дают значения  $1-5$  мкм.

Как показали исследования, в состоянии с высоким сопротивлением, когда ток утечки через диэлектрик мал, величина стационарного фототока, протекающего через структуру, также незначительна. В рассматриваемом случае кинетика фототока типична для МДП структур с толстым диэлектриком: она знакопеременна и характеризуется начальным и конечным всплеском тока чисто емкостного характера.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при переключении кремниевых МДП структур с диэлектриком из фторида РЗЭ в состояние с низким сопротивлением их электрофизические характеристики значительно изменяются и становятся подобными зависимостям, характерным для структур металл-(туннельно-тонкий диэлектрик)-полупроводник (МТДП) [4,5]. На рис. 2 представлены обратные ветви ВАХ МДП структур  $Al-CeF_3-n-Si$  в низкоомном состоянии, измеренные при



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики структуры  $Al-CeF_3-Si$  в низкоомном состоянии при стационарной подсветке ( $\lambda = 0.63$  мкм). Интенсивность светового потока, кВт/( $cm^2 \cdot c$ ): 1 —  $7.6 \cdot 10^{16}$ , 2 —  $2.5 \cdot 10^{18}$ .



**Рис. 3.** Вольт-фарадная характеристика МДП структуры  $Al-CeF_3-p-Si$  в низкоомном состоянии в темноте (1) и при освещении (2).

стационарной подсветке. ВАХ МДП структур с фторидами РЗЭ в низкоомном состоянии при освещении имеют два характерных участка. На начальном участке при  $V < V^{cr}$  ток через структуру ограничивается током утечки через диэлектрик. При  $V > V^{cr}$  происходит насыщение фототока, при этом приложенное напряжение падает на области пространственного заряда (ОПЗ).

На рис. 3 представлены вольт-фарадные характеристики структуры  $Al-CeF_3-n-Si$  в низкоомном состоянии в темноте и при освещении светом от лампы накаливания. Как показали исследования, при освещении структуры увеличение скорости генерации неосновных носителей заряда приводит к насыщению поверхностной концентрации неосновных носителей. В этом случае переход

вольт-фарадной зависимости  $C(V)$  в режим неравновесного обеднения, когда в области кремния имеется обедненный слой, толщина которого растет с увеличением напряжения на структуре, происходит при более высоких напряжениях обратного смещения ( $V > V^{cr}$ ), чем в темноте.

Общее уравнение нейтральности МТДП структуры с учетом распределения приложенного к структуре напряжения  $V$ , падений напряжения в диэлектрике  $V_d$ , полупроводнике  $V_S$  и на нагрузочном сопротивлении  $V_L$  можно записать в виде (для МДП структуры с подложкой  $n$ -типа) [6,7]

$$V = \frac{kT}{q} y_S - V_L - \frac{qn_0 L_D}{C_d} \left( \frac{p_S}{n_0} - y_S - 1 \right)^{1/2} \mp V_{FB}, \quad (1)$$

где  $V_{FB}$  — напряжение плоских зон, положительный знак соответствует обогащающему начальному изгибу зон;  $y_S = qV_S/kT$  — безразмерный поверхностный потенциал;  $C_d$  — удельная емкость диэлектрика;  $n_0$  — концентрация электронов в объеме полупроводника;  $p_S$  — поверхностная концентрация дырок;  $L_D = (\epsilon_0 \epsilon_S kT / 2q^2 n_0)^{1/2}$  — длина экранирования Дебая.

Как показывает анализ [6,7], при некотором значении обратного смещения  $V^{cr}$  поверхностная концентрация неосновных носителей (дырок) в МТДП структуре  $p_S$  насыщается, при этом дальнейшее увеличение напряжения на затворе не вызывает возрастания заряда инверсионного слоя. Условие насыщения записывается в виде [6,7]

$$V^{cr} = \frac{kT}{q} y_S - \frac{qn_0 L_D}{C_d} \left( \frac{4I^*}{\bar{D}_p V_p n_0} - y_S \right)^{1/2} - V_L \mp V_{FB}, \quad (2)$$

где  $I^*$  — поток электронно-дырочных пар, генерированных светом в единицу времени;  $V_p$  — тепловая скорость дырок;  $\bar{D}_p$  — коэффициент туннельной прозрачности дырок.

Используя методику, приведенную в [7], для исследуемых структур получены следующие значения падения напряжения на различных областях структуры при  $V^{cr}$ . Напряжение, падающее на обедненном слое:

$$V_S = \frac{kT}{q} y_S \approx -0.6 \text{ В};$$

падение напряжения на диэлектрике

$$V_d = \frac{qn_0 L_D}{C_d} \left( \frac{4I^*}{\bar{D}_p V_p n_0} - y_S \right)^{1/2} \approx 1.4 \div 10.7 \text{ В}.$$

При проведении оценок использовались следующие величины, соответствующие данным эксперимента:

$$I = 7.6 \cdot 10^{16} \div 4.8 \cdot 10^{18} \text{ кВТ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}),$$

$$I^* = 8.4 \cdot 10^{14} \div 5.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1};$$

$$\bar{D}_p = 10^{-9}; \quad C_d = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}/\text{см}^2; \quad V_p = 10^7 \text{ см}/\text{с};$$

$$n_0 = 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}; \quad L_D = 9.68 \cdot 10^{-6} \text{ см}.$$

Величина удельной емкости диэлектрика  $C_d$  в данных структурах примерно на 2 порядка меньше, чем в МТДП структурах с одинаковой толщиной туннельно-тонкого диэлектрика по всей площади структуры. Это связано с локальным характером изменений, происходящих в слое диэлектрика под верхним напыленным контактом после переключения МДП структуры в низкоомное состояние. Толщина слоя туннельно-тонкого диэлектрика  $d$  оценивалась из разницы в величинах емкости МДП структуры в высокоомном и низкоомном состояниях, равной  $1 \div 15$  пФ. Исследования показывают, что туннельно-тонкий слой диэлектрика толщиной  $d = 10\text{--}40 \text{ \AA}$  формируется только в области канала проводимости малого радиуса  $\sim 1\text{--}5$  мкм на границе раздела полупроводник-〈материал канала проводимости〉, остальная область диэлектрика под контактом остается без изменения и сохраняет исходную толщину  $\sim 0.25 \div 0.45$  мкм.

Определенное из эксперимента значение  $V^{cr}$  составляет  $0.5 \div 37$  В, при этом падение напряжения на нагрузочном сопротивлении  $R_L = 2 \div 10$  кОм составляет  $V_L = 0.1 \div 20$  В. Из соотношения (2) следует, что абсолютное значение  $V^{cr}$  увеличивается с ростом  $I^*$  (т.е. с ростом интенсивности падающего излучения), что и наблюдалось нами экспериментально (рис. 2).

Таким образом, в условиях эксперимента реализуется ситуация, когда значительная часть напряжения, приложенного к структуре МТДП, падает на диэлектрике. При этом может быть реализована специфическая энергетическая зонная диаграмма МДП структуры (с туннельно-тонким диэлектриком) с внутренним усилением фототока. Для рассматриваемого случая характерным является рост тока электронов, туннелирующих из металла в полупроводник по мере увеличения обратного смещения и интенсивности освещения (для МТДП структур с подложкой  $n$ -типа). Фототок основных носителей становится сравнимым или больше тока неосновных носителей, что означает режим усиления.

Данные для различных интенсивностей освещения, полученные на основе измеренных значений фототока насыщения, дают максимальное значение амперваттной чувствительности  $\sim 0.7 \text{ А}/\text{Вт}$  на длине волны  $0.63$  мкм. При этом параметры исследуемых структур были неоптимальными: часть поверхности структуры была закрыта измерительным зондом и примерно  $40 \div 90\%$  падающего на структуру излучения отражалось металлическим электродом. Для фотозлектрических устройств с оптимальными параметрами без усиления фототока наибольшая величина амперваттной чувствительности для данной длины волны излучения равнялась  $0.4 \text{ А}/\text{Вт}$ . Данный результат свидетельствует об усилении фототока в исследуемых структурах.

Исследование формы кинетики фототока МДП структур с фторидами РЗЭ в низкоомном состоянии проводилось при освещении структур импульсами монохроматического излучения различной длительности. Установлено, что кинетические характеристики фототока  $J_{ph}(t)$  при приложении к структуре обратного смеще-

ния  $V = -32$  В хорошо аппроксимируются гиперболическими зависимостями следующего вида:

$$J_{ph}(t) = qI^*M_{ph}A \begin{cases} 1 - \frac{1}{(1+t/\tau_d)^2}, \\ \frac{1}{(1+t/\tau_d)^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где первое уравнение соответствует включению освещения в момент  $t = 0$ , а второе — выключению освещения в момент  $t = 0$ ;  $M_{ph} = (J_n + J_p)/J_p$  — коэффициент усиления фототока для структур с подложкой  $n$ -типа;  $J_n$  — фототок основных носителей (электронов);  $J_p$  — фототок неосновных носителей (дырок);  $\tau_d$  — характерное время релаксации, определяемое выражением

$$\tau_d = \frac{2L_D(n_0)^{1/2}}{[S_{pe}^0 \exp(y_S^0)I^*]^{1/2}}. \quad (4)$$

Здесь

$$S_{pe} = \left(\frac{1}{4}V_p\bar{D}_p\right) \exp(-y_S)$$

— эффективная скорость эмиссии дырок из полупроводника в металл; верхний индекс "0" соответствует случаю отсутствия освещения в начальный момент времени.

Известно [8,9], что кинетика фотоответа МТДП структур имеет различный характер. Если скорость туннельного оттока носителей заряда через диэлектрик превышает скорость их рекомбинации, то факторы, определяющие время фотоответа в структурах, такие же, как в  $p$ - $n$ -переходах. В структурах, где время фотоответа

определяется временем накопления неосновных носителей в приповерхностной потенциальной яме, может наблюдаться эффект усиления фототока, который можно зарегистрировать по специфическому виду кинетики фотоответа и возрастанию фототока. В последнем случае время релаксации уменьшается с ростом интенсивности освещения, что подтверждают осциллограммы фотоответа МДП структур с фторидами РЗЭ в низкоомном состоянии, представленные на рис. 4.

Анализ релаксационных явлений в МТДП структурах, проведенный в [9], показывает, что плотность полного тока через МТДП структуру с подложкой  $n$ -типа определяется суммой тока смещения и плотности омического тока неосновных носителей заряда (дырок):

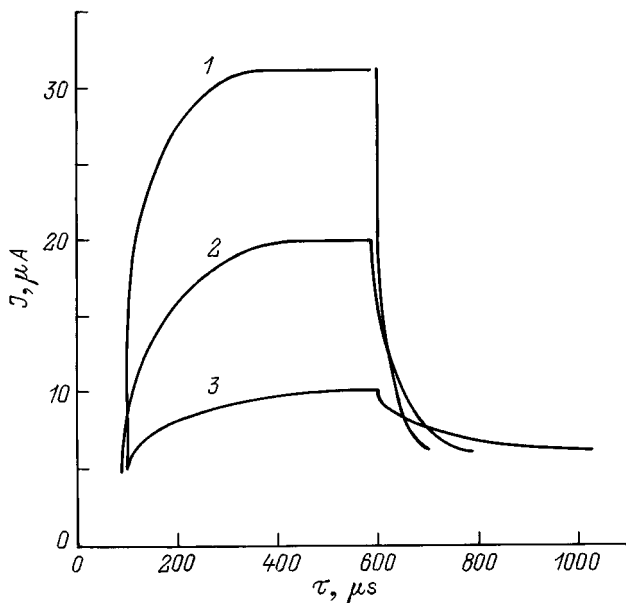
$$J_{ph}(t) = \varepsilon_0\varepsilon_S \frac{dE_S}{dt} + qS_{pe}\Delta p^*(t), \quad (5)$$

где  $E_S$  — напряженность электрического поля на поверхности полупроводника;  $\Delta p^*$  — приращение поверхностной неравновесной концентрации дырок, обусловленное освещением. При усилении фототока необходимо в уравнении (5) учесть наличие тока основных носителей заряда, например для МТДП структур с подложкой  $n$ -Si это ток электронов. Тогда плотность тока описывается соотношением

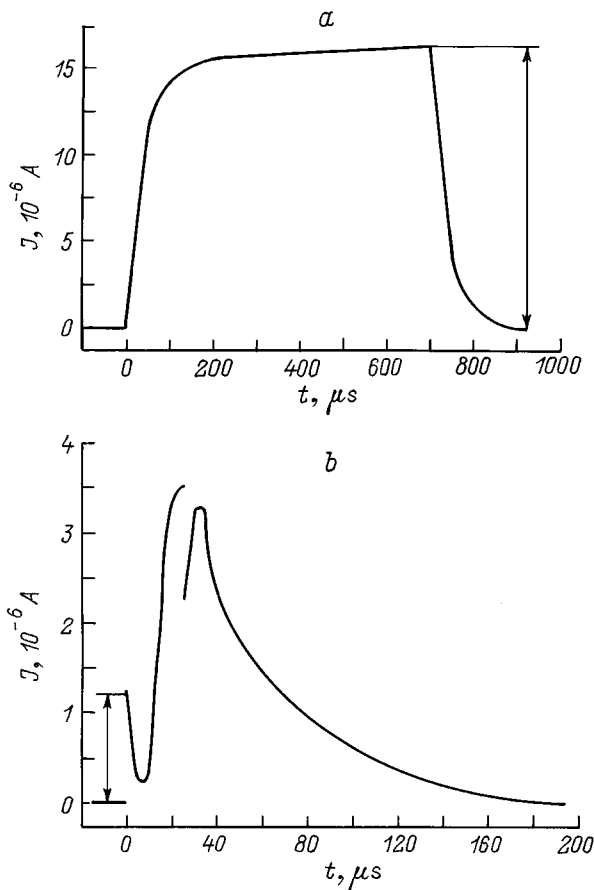
$$J_{ph}(t) = \varepsilon_0\varepsilon_S \frac{dE_S}{dt} + qM_{ph}S_{pe}\Delta p^*(t). \quad (6)$$

Для больших коэффициентов усиления фототока  $M_{ph} \gg 1$  первым слагаемым в правой части уравнения (6) можно пренебречь, что с учетом уравнения непрерывности для потока неосновных носителей позволяет получить выражение (3), описывающее кинетические характеристики исследуемых МДП структур в низкоомном состоянии. При этом предполагается инверсия проводимости и отсутствие вырождения неосновных носителей заряда на поверхности полупроводника [9]. Таким образом, экспериментальные характеристики фотоответа хорошо согласуются с теоретическими зависимостями.

Исследование кинетических характеристик фототока показывает, что на осциллограммах фотоответа можно выделить участки емкостного тока при выключении и включении освещения. На рис. 5, а представлена полная осциллограмма фототока структуры Al-CeF<sub>3</sub>- $p$ -Si в низкоомном состоянии при освещении прямоугольным импульсом света, когда к структуре приложено постоянное напряжение  $V = -32$  В. На рис. 5, б представлена эта же характеристика при меньшем времени длительности импульса освещения, что дает возможность более детально рассмотреть начальный и конечный всплески тока чисто емкостного характера. Данный ток определяется выражением  $J_{ph}(0) = qAI^* = 1.3$  мкА и равняется току фотогенерации неосновных носителей заряда. Он устанавливается за время, существенно меньшее, чем  $\tau_d$ , и определяется большей из величин: времени пролета носителей через ОПЗ или  $RC$  (где  $R$  — сопротивление нагрузки,  $C$  — емкость структуры и соединительных проводов). Величина фототока насыщения  $J_{ph}(\infty)$



**Рис. 4.** Осциллограммы фотоответа МДП структуры Al-DyF<sub>3</sub>- $p$ -Si в низкоомном состоянии при различных величинах интенсивности излучения с длиной волны  $\lambda = 0.93$  мкм. 1 —  $I_1$ , 2 —  $I_2$ , 3 —  $I_3$ ;  $I_1 > I_2 > I_3$ .



**Рис. 5.** Кинетика фототовета структуры Al-CeF<sub>3</sub>-p-Si в низкоомном состоянии при длительностях импульса излучения τ, мкс: *a* — 700, *b* — 25. Стрелками обозначены величины фототоков: на рис. *a* —  $J_{ph}(\infty)$ , на рис. *b* —  $J_{ph}(0)$ .

превосходит значение  $J_{ph}(0)$ , что означает реализацию режима усиления фототока. Возможность разделения во времени токов основных и неосновных носителей позволяет из кинетики фототока непосредственно вычислить коэффициент усиления фототока в структуре как отношение полной амплитуды фототовета  $J_{ph}(\infty)$ , состоящей из тока основных и неосновных носителей заряда, к амплитуде начального участка фототока  $J_{ph}(0)$ . Для характеристики, представленной на рис. 5, коэффициент усиления равен  $M_{ph} = 13$ . Максимальное значение коэффициента усиления фототока составило  $M_{ph} = 49$  и  $M_{ph} = 34$  для структур на основе кремния *p*- и *n*-типа проводимости соответственно.

При интенсивности освещения, равной  $I = 3 \cdot 10^{17}$  кВт/(см<sup>2</sup> · с), максимальная величина амперваттной чувствительности составляет 0.5 А/Вт на длине волны 0.93 мкм. Учет световых потерь на отражение от поверхности исследуемой структуры и для величины квантовой эффективности в кремнии  $\eta \approx 0.3$  дает величину потока электронно-дырочных пар, генерированных светом в единицу времени  $I^* = 3.3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>. Отсюда величина емкостного

тока  $J_{ph}(0) = qAI^* = 1.3 \cdot 10^{-6}$  А, что согласуется с результатами эксперимента. Необходимо отметить, что уравнение (3) описывает только омический сквозной ток, величина которого при включении освещения в начальный момент времени равна 0. Из кинетики фототовета кремниевых МДП структур с фторидами РЗЭ в низкоомном состоянии можно определить время релаксации, которое равнялось  $\tau_{rel} = 50 \div 450$  мкс и  $\tau_{rel} = 30 \div 180$  мкс для образцов с *p*- и *n*-Si соответственно. Так как

$$S_{pe}^0 \exp(y_s^0) = \frac{1}{4} \bar{D}_p V_p, \tag{7}$$

то, подставляя (7) в формулу (4), получим

$$\bar{D}_p = \frac{16L_D^2 n_0}{\tau_d^2 V_p I^*}. \tag{8}$$

Из выражения (8) можно определить коэффициент туннельной прозрачности дырок  $\bar{D}_p$  для структуры с подложкой *n*-типа и коэффициент туннельной прозрачности электронов  $\bar{D}_n$  для структуры с подложкой *p*-типа. Определенные таким образом значения коэффициентов туннельной прозрачности лежат в пределах  $\bar{D}_n = 2.7 \cdot 10^{-11} \div 2.2 \cdot 10^{-8}$ ,  $\bar{D}_p = 1.7 \cdot 10^{-10} \div 4.7 \cdot 10^{-8}$ . В соответствии с выражением (8) время релаксации увеличивается с уменьшением коэффициента туннельной прозрачности для неосновных носителей заряда.

В рассматриваемом случае канал проводимости, образующийся в пленке диэлектрика в низкоомном состоянии, является одновременно и верхним токоподводящим контактом к МТДП структуре и влияет на ее фотоэлектрические характеристики. Как отмечено в [10], при замене металлического электрода в МТДП структуре сильно легированным полупроводником создается ПТДП структура. При этом эффект усиления можно получить только в изотипных ПТДП структурах, поскольку в анизотипных ПТДП структурах туннельный ток основных носителей блокируется. Поскольку усиление фототока в исследуемых МДП структурах в низкоомном состоянии реализуется на структурах с подложками как *p*-, так и *n*-типа проводимости, это дает основание предполагать, что материал канала проводимости имеет металлическую природу.

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

### Список литературы

- [1] В.А. Рожков, М.Б. Шалимова. Письма ЖТФ, **18**(5), 74 (1992).
- [2] В.А. Рожков, М.Б. Шалимова. ФТП, **27**, 438 (1993).
- [3] В.А. Рожков, Н.Н. Романенко. Письма ЖТФ, **19**(22), 6 (1993).

- [4] В.А. Рожков, М.Б. Шалимова. Письма ЖТФ, **24**(16), 92 (1998).
- [5] В.А. Рожков, М.Б. Шалимова. ФТП, **32**, 1349 (1998).
- [6] А.Я. Вуль, С.В. Козырев, В.И. Федоров. ФТП, **15**, 142 (1981).
- [7] А.Я. Вуль, В.И. Федоров, Ю.Ф. Бирюлин, Ю.С. Зинчик, С.В. Козырев, И.И. Сайдашов, К.В. Санин. ФТП, **15**, 525 (1981).
- [8] А.Я. Вуль, А.Т. Дидейкин, С.В. Козырев. В сб.: *Фотоприемники и фотопреобразователи* (Л., Наука, 1986) с. 105.
- [9] А.Я. Вуль, А.Т. Дидейкин, Ю.С. Зинчик, К.В. Санин, А.В. Саченко. ФТП, **17**, 1471 (1983).
- [10] А.Я. Вуль, А.В. Саченко. ФТП, **17**, 1361 (1983).

*Редактор Т.А. Полянская*

## **Photoelectric effects in switching silicon structures with rare–earth element fluorides**

V.A. Rozhkov, M.B. Shalimova

Samara State University,  
443011 Samara, Russia

**Abstract** Results of a photoelectric characteristic study of switching silicon structures metal–dielectric–semiconductor are presented. Materials used as dielectric were cerium, dysprosium, erbium fluorides. It is shown that in a low resistance state their photoelectric characteristics are identical to those of the metal-tunnel dielectric–semiconductor structure, in particular, the mechanism of injection amplification of the photocurrent takes place.

E-mail: rozhkov@ssu.samara.ru