

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СПАДА ФОТОПРОВОДИМОСТИ
В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ОСМИЕМ

С. А. Азимов, М. С. Юнусов, Г. Нуркузиев

Физико-технический институт им. С. В. Стародубцева Академии наук Узбекистана, 700084, Ташкент, Узбекистан
(Получена 20 августа 1991 г. Принята к печати 14 июля 1992 г.)

Из исследований кинетики спада фотопроводимости и кинетики фотоемкости определены параметры уровней, возникающих при введении осмия в Si *n*- и *p*-типа проводимости. Идентифицированы два акцепторных уровня [$E_c - 0.18$ эВ и $E_c - (0.53 \div 0.56)$ эВ] в *n*-Si (Os), а также донорный ($E_v + 0.18$ эВ) и акцепторный [$E_c - (0.53 \div 0.56)$ эВ] в *p*-Si (Os).

Найдены сечения захвата носителей заряда на уровни. Высказано предположение, что в образовании уровней участвуют комплексы осмия с первоначально введенной примесью (бор или фосфор).

Параметры уровней, которые образует осмий при введении в кремний, были исследованы в работах [1-3]. Впервые на основании исследований электрофизических свойств *n*- и *p*-кремния с примесью осмия было показано [1], что осмий создает три энергетических уровня — $E_c - 0.18$, $E_c - (0.53 \div 0.56)$ и $E_v + 0.18$ эВ соответственно с акцепторными и донорными свойствами. Была также установлена зависимость образования уровней $E_v + 0.18$ и $E_c - 0.18$ эВ от природы образующихся центров осмия.

В работе [3] исследованы спектры фотопроводимости (ФП) *n*- и *p*-Si, легированного осмием. Показано, что вид спектра ФП *n*-Si (Os) в области $h\nu \geq 0.93$ эВ зависит от концентрации фосфора. Уменьшение фотоответа в области двойных оптических переходов ($h\nu \geq 0.93$ эВ) связано с прилипанием электронов на уровень $E_c - (0.18 \div 0.22)$ эВ в *n*-Si (Os) и прилипанием дырок на уровень $E_v + (0.18 \div 0.22)$ эВ в *p*-Si (Os). Из измерений релаксации фотоемкости (ФЕ) определены спектральные зависимости сечений захвата фотонов на уровни осмия.

Цель данной работы — исследование кинетики спада фотопроводимости и определение сечения захвата носителей на глубокие уровни осмия в кремнии. Для оценки сечения захвата в *n*- и *p*-Si (Os) была исследована кинетика ФЕ при освещении собственным светом.

Образцы и методы измерений

Легирование кремния осмием производилось диффузионным методом по описанной в [1, 3] технологии. Типичные размеры образцов $10 \times 5 \times 1$ мм. Исследование кинетики ФП проводилось при 77 К с помощью спектрометра ИКС-21 от стационарного освещения. Ток регистрировался электрометрическим усилителем У1-2 или ЭД-05М. Источником собственного света служил светодиод из GaAs. Электрическое поле в образце не превышало 100 В/см.

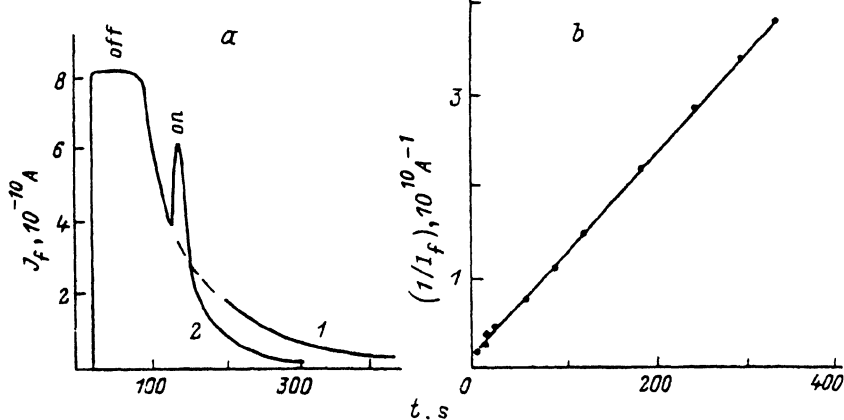


Рис. 1. Спад ФП и индуцированной ФП в образцах n -Si(Os) (a); зависимость обратной величины фототока (b). 1 — спад ФП в темноте после освещения собственным светом; 2 — вспышка ФП при освещении светом с $h\nu = 0.56 \pm 0.96$ эВ.

Для оценки сечений захвата (σ_i) уровней Os в кремнии был использован метод ФЕ [4]. Измерение кинетики релаксации емкости проводилось при 77 К мостовым методом на частоте 150 кГц при напряжении на образце ~ 7 В [5-7]. Диоды тщательно экранировались от рассеянного света металлическими экранами, а на вход монохроматора помещались фильтры из Ge и Si.

Результаты измерений и обсуждение

Кинетика спада кремния n - и p -типа измерялась на образцах с определенными исходными удельными сопротивлениями: $\rho \approx 0.8, 5.5$ и $3, 50$ Ом \cdot см, значения которых после диффузии Os (при 1280 $^{\circ}$ С в течение 10 ч) увеличились до $\sim 1.5, 4.5 \cdot 10^4$ Ом \cdot см для образцов n -типа и $\sim 3.5, 5 \cdot 10^3$ Ом \cdot см для образцов p -типа соответственно при 300 К. В образцах обоих типов наблюдалось инфракрасное (ИК) гашение ФП [3].

Кинетика спада и вспышка после освещения собственным светом приведены на рис. 1, a и 2. В n -Si(Os) наблюдался медленный спад ФП за десятки и несколько сотен секунд по закону биомолекулярной рекомбинации (рис. 1, b). Во время спада собственной ФП можно наблюдать вспышку ФП при $h\nu = 0.56 \pm 0.96$ эВ. В этой спектральной области амплитуда вспышки в 3—5 раз превосходит собственную ФП. Скорость спада ФП при освещении примесным светом возрастает, а после выключения примесного света фототок быстро спадает до значений, несколько меньших, чем при спаде ФП в темноте (рис. 1, a, кривые 1, 2). В этой же спектральной области при

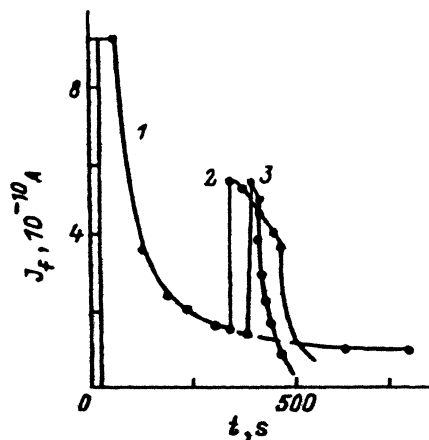


Рис. 2. Спад ФП и индуцированной ФП в образцах p -Si(Os). 1 — спад ФП в темноте после освещения собственным светом с $h\nu = 0.2 + 0.43$ эВ; 2, 3 — вспышка ФП при освещении светом с $h\nu = 0.56 \pm 0.98$ эВ.

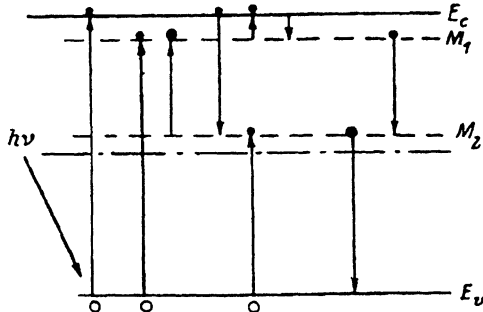


Рис. 3. Зонная диаграмма *n*-кремния, легированного осмием.

комбинированном освещении наблюдается небольшое (~50%) увеличение примесной ФП.

Описанные выше экспериментальные результаты могут быть объяснены предположительно тем, что уровень M_1 ($E_c - 0.18$ эВ) является уровнем прилипания для электронов и степень заполнения уровня M_2 ($E_c - 0.53$ эВ) при освещении собственным светом практически не изменяется, а ФП определяется в основном накоплением дырок в валентной зоне (рис. 3). Кинетика спада ФП определяется обратным захватом электронов на пустые уровни M_2 , и, поскольку $n = N = M_2$, спад происходит по бимолекулярному закону [5, 8]:

$$\frac{(q\mu_n VS/l) d(1/I)}{dt} = \sigma_n v_t, \quad (1)$$

где S , l — площадь и толщина образца, V — напряжение, μ_n — подвижность носителей. При $v_t = 10^7$ см/с было определено сечение захвата электронов σ_n на уровень M_2 .

Найденное значение σ_n оказалось равным $\sigma_n \approx 1.38 \times 10^{-16}$ см². Освещение образца примесным светом с $h\nu = 0.56 \div 0.96$ эВ в процессе спада собственной ФП приводит к генерации электронов с уровней M_1 в зону проводимости и их валентной зоны на уровень M_2 . При этом наблюдаются сравнительно слабое влияние примесной подсветки на кинетику спада ФП и быстрый спад фототока. Включение примесного света показывает, что сечение захвата дырок на уровень M_2 велико и обусловлено практически отсутствием неконтролируемых рекомбинационных центров.

Спад ФП в образцах *p*-Si (Os) также происходит медленно за десятки и сотни секунд и хорошо укладывается в закон бимолекулярной рекомбинации. Во время спада ФП наблюдается вспышка ФП при $h\nu = 0.56$ и 0.98 эВ. В этих спектральных областях для использованной нами интенсивности подсветки амплитуда вспышки в 2—3 раза превосходит собственную ФП. При подсветке светом с $h\nu = 0.2 \div 0.43$ эВ спад ФП происходит медленно, примерно с той же скоростью, что и в темноте (рис. 2, кривая 1). В случае подсветки светом с $h\nu = 0.56$ и 0.98 эВ спад происходит быстрее (рис. 2, кривые 2, 3) и приводит к росту фототока. Спад ФП после выключения собственного света происходит медленно, что свидетельствует о наличии в образце уровней прилипания [3].

Описанные выше экспериментальные результаты могут быть объяснены тем, что при освещении светом с $h\nu > 0.56$ и 0.98 эВ электроны из валентной зоны переходят на уровни M_3 ($E_v + 0.18$) и M_2 ($E_c - 0.53$ эВ). Уровень M_3

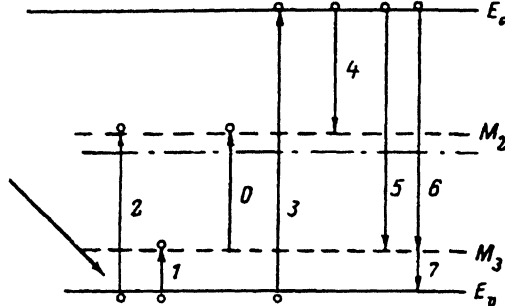


Рис. 4. Зонная диаграмма *p*-кремния, легированного осмием.

является уровнем прилипания для дырок (рис. 4). Кинетика спада ФП *p*-Si (Os) также описывается законом бимолекулярной рекомбинации; сечения захвата $\sigma_{n\text{eff}} \approx 5.6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ вычислены из формулы (1).

Таким образом, центр M_1 ($E_c - 0.18 \text{ эВ}$) является уровнем прилипания для электронов в *n*-Si (Os), а центр M_3 ($E_v + 0.18 \text{ эВ}$) — для дырок в *p*-Si (Os).

Быстрый спад ФП можно объяснить следующим образом: при подсветке образца примесным светом электрон из валентной зоны переходит на соответствующие уровни (рис. 4, переходы 1—3), при этом вероятность перехода 3 очень мала. При освещении комбинированным светом заброс носителей происходит со следующей вероятностью: $7 < 6 < 5 < 4$, с преобладанием 1—5 над 6, 7. В результате спад ФП в области с $h\nu \geq 0.56$ и 0.98 эВ происходит быстро, а красная граница ФП смещается в инфракрасную область.

Сечения захвата носителей тока оценены также на основе данных по кинетике релаксации емкости (при включении обратного напряжения) в темноте после снятия освещающего диод короткого импульса света с различной энергией $h\nu$: $\leq E_g/2$, $> E_g$ [4]. Площадь *p*—*n*-перехода 15 мм^2 , толщина базы $0.6 \div 0.8 \text{ мм}$. Освещение проводилось со стороны, противоположной *p*—*n*-переходу. В этом случае, измеряя фототок (I_f), определим постоянную времени перезарядки глубокого уровня, зависящего от сечения захвата носителя [4]:

$$\Theta_c = \frac{I_f}{\nu_i \sigma_n \bar{n}}, \quad (2)$$

где \bar{n} — средняя концентрация носителей в слое объемного заряда, связанная с фототоком (I_f). Она определяется из соотношения

$$\bar{n} = \frac{I_f}{qS\nu_d}, \quad (3)$$

где q — заряд электрона, S — площадь *p*—*n*-перехода, ν_d — дрейфовая скорость носителей в сильных электрических полях.

Из соотношений (2) и (3) можно получить расчетную формулу

$$\sigma_n = \frac{qS}{\Theta_c I_f} \frac{\nu_d}{\nu_i}, \quad (4)$$

где σ_n — сечение захвата электронов, $\nu_i = \nu_d$ ($\nu_i = 10^7 \text{ см/с}$). Формула (4) справедлива для определения сечения захвата электронов и дырок. Измерения емкости проводили при постоянном обратном смещении на *p*—*n*-переходе при довольно сильных электрических полях ($10^3 \div 5 \cdot 10^4 \text{ В/см}$).

Измерения кинетики перезарядки уровней при подсветке собственным светом показали, что при одновременном заполнении обоих уровней Os в

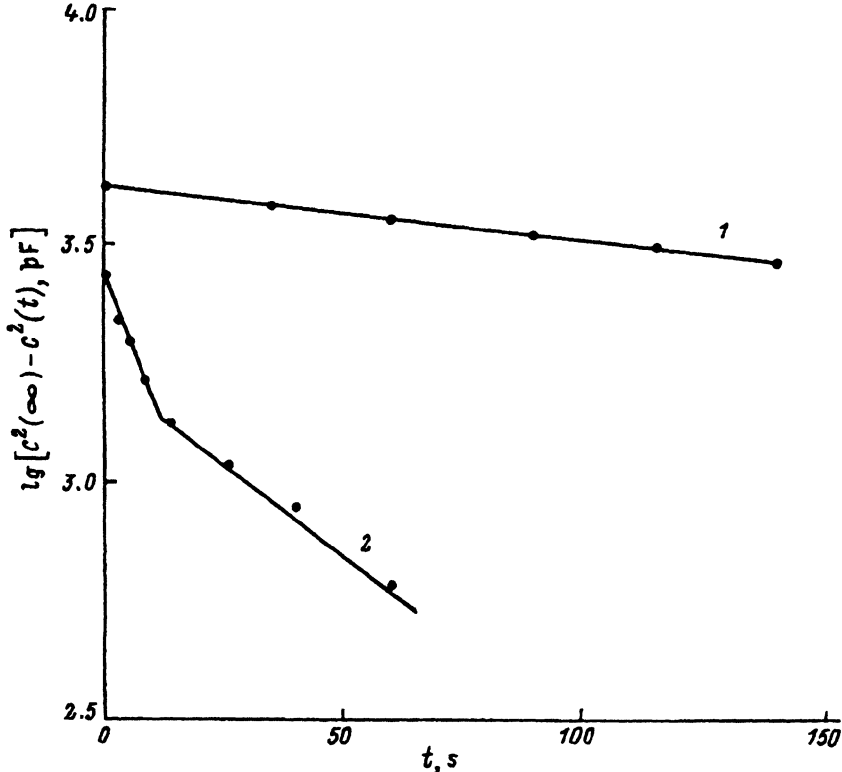


Рис. 5. Зависимость $\lg \Delta C \sim f(t)$ в диодах $p\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$.

$p\text{-Si}$ зависимость $\lg \Delta C^2 = f(t)$ имеет два наклона и постоянные времена отличаются друг от друга примерно в 1.5 раза (рис. 5, кривая 2) для уровня M_2 (рис. 4). Если же уровень M_2 предварительно заполнить (в процессе подсветки примесным светом), то указанная зависимость будет иметь только медленную составляющую (рис. 5, кривая 1). Для определения сечения захвата носителей из темнового нарастания емкости на основе формулы (4) находим общее значение.

Далее, освещая собственным светом из первого наклона (рис. 5, кривая 2) находим сечение захвата для уровня 0.53 эВ. Вычитая значение, полученное для уровня 0.53 эВ, из общего значения сечения захвата носителей, находим сечение захвата носителей для уровня 0.18 эВ. Аналогично в $n\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$ были проведены измерения кинетики перезарядки уровней собственным светом. Зависимость $\lg \Delta C^2 = f(t)$ имеет один наклон (рис. 6, кривые 1, 2). Отсюда были определены сечения захвата носителей $\sigma_{n, \text{eff}}$ n - и $p\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$ для каждого уровня в отдельности. Полученные значения приведены в таблице.

Образцы	Уровни	Е, эВ	$\sigma_p, \text{см}^{-2}$	$\sigma_n, \text{см}^{-2}$
$n\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$	M_1	$E_c - 0.18$	$3.5 \cdot 10^{-18}$	—
	M_2	$E_c - 0.53$	$8.7 \cdot 10^{-17}$	—
$p\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$	M_3	$E_v + 0.18$	—	$5 \cdot 10^{-16}$
	M_2	$E_c - 0.53$	—	$3.1 \cdot 10^{-15}$

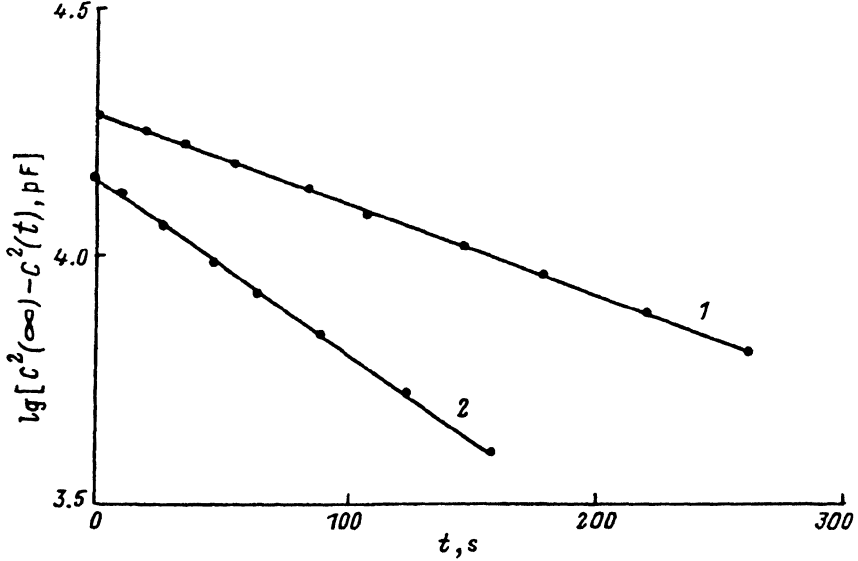


Рис. 6. Зависимость $\lg \Delta C \sim f(t)$ в диодах $n\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$.

Согласно приведенным данным, можно сделать следующее заключение.

1. При легировании кремния осмием образуются акцепторные уровни $M_1 (E_c - 0.18)$ и $M_2 [E_c - (0.53 \div 0.56) \text{ эВ}]$ в $n\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$, донорный $M_3 (E_v + 0.18)$ и акцепторный $M_2 [E_c - (0.53 \div 0.56) \text{ эВ}]$ уровни в $p\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$.

Таким образом, определенные эффективные значения σ_n в кремнии n - и p -типа по ФЕ методике и по спаду ФП находятся в хорошем согласии. При освещении ФЕ диодов $p\text{-Si}\langle\text{Os}\rangle$ собственным светом в зависимости $\lg \Delta C^2 = f(t)$ обнаружена нелинейность (рис. 5, кривая 2).

Сечение захвата электрона на уровень $E_v + 0.18$ эВ, определенное нами, коррелирует с данными [7, 9, 10]. На основании ФЕ исследований показано различие сечения захвата электронов на уровни, принадлежащие различным центрам Os в кремнии.

2. Практически все электрические активные атомы введенного осмия являются фотоактивными.

3. Возникновение уровней $E_v + 0.18$ в $p\text{-Si}$ и $E_c - 0.18$ эВ в $n\text{-Si}$ позволяет предположить, что отдельные центры осмия связаны с комплексами, в образовании которых играют роль как природа первоначальных легирующих примесей (бор или фосфор), так и зарядовое состояние составляющих этого комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] С. А. Азимов, Ф. Р. Каримов, Ш. Махкамов, Г. Нуркузиев, М. С. Юнусов. ФТП, 10, 2164 (1976).
- [2] С. А. Азимов, М. С. Юнусов, Г. Нуркузиев, Ф. Р. Каримов. ФТП, 12, 1656 (1978).
- [3] С. А. Азимов, М. С. Юнусов, Г. Нуркузиев, Ш. Махкамов. ФТП, 13, 239 (1979).
- [4] А. А. Лебедев. ФТП, 8, 457 (1974).
- [5] А. А. Лебедев, М. С. Юнусов, А. Т. Мамадалимов, Н. А. Турсунов. ФТП, 8, 691 (1974).
- [6] С. М. Чернин, А. А. Мальцев. ПТЭ, 4, 188 (1964).
- [7] М. С. Юнусов, Ш. Махкамов, М. Каримов. ФТП, 10, 1015 (1976).
- [8] С. М. Рывкин. Фотозлектрические явления в полупроводниках, 494. М. (1963).

- [9] Л. С. Берман, А. А. Лебедев. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. 176. Л. (1981).
- [10] М. С. Юнусов. Физические явления в кремнии, легированном элементами платиновой группы. 788. Ташкент (1983).

Редактор В. В. Чалдышев
