

РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОЭДС В КРЕМНИЕВЫХ МДП СТРУКТУРАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА

© В.Н.Давыдов, С.Н.Несмелов

Томская государственная академия систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия
(Получена 26 июня 1995 г. Принята к печати 24 июля 1995 г.)

Проведено экспериментальное исследование релаксации малосигнальной фотоэдс, вызванной действием импульса электрического поля длительностью 40 с и амплитудой от -5 В до 5 В на МДП структуры n -Si-SiO₂, p -Si-SiO₂, n -Si-(V₂O₅-B₂O₃-CaO). Релаксация фотоэдс может быть вызвана изменением заряда в диэлектрике вследствие инжекции носителей заряда из полупроводника и полевого электрода на фронтах импульса, а также миграции заряда в диэлектрике под действием электрического поля импульса.

Электрическая деградация полупроводниковых МДП приборов, как известно, в первую очередь обусловлена изменением зарядового состояния диэлектрического слоя и межфазной границы. Накопление заряда имеет место даже в сравнительно слабых полях порядка 10^6 В/см, действующих в течение десятков минут и более [1-3]. Исследование влияния коротких (по сравнению с указанным временем) импульсов электрического поля на свойства МДП структур может дать полезную информацию о процессах, предшествующих накоплению заряда в структуре. Для этой цели пригодны лишь малосигнальные методы, среди которых метод малосигнальной фотоэдс выделяется как наиболее чувствительной к изменениям свойств МДП структур [3].

Цель данной работы — экспериментальное исследование релаксации малосигнальной фотоэдс, вызванной действием импульса электрического поля на структуры n -Si-SiO₂, p -Si-SiO₂, n -Si-(V₂O₅-B₂O₃-CaO) применительно к установлению механизма электроиндуцированных изменений в поверхностно-барьерных структурах.

Образцы и методика эксперимента

Для эксперимента использовались МДП структуры n -Si-SiO₂, p -Si-SiO₂, n -Si-(V₂O₅-B₂O₃-CaO), которые изготавливались из монокристаллов кремния марки КЭФ-4.5 ориентации [100]. Слой SiO₂ нанесен методом термического окисления в хлорсодержащей среде при $T = 1050^\circ\text{C}$ после химико-механической полировки. Слой

($V_2O_5-B_2O_3-CaO$) получен методом магнетронного распыления. Толщина диэлектрика — 100 нм, площадь металлического электрода — 10^{-2} см^2 .

Экспериментальная установка, с помощью которой проводились исследования, подробно описана в [3]. Амплитуда импульса ΔV варьировалась от -5 В до $+5 \text{ В}$. Наблюдение релаксации фотоэдс осуществлялось следующим образом. После приложения к полевому электроду постоянного напряжения V_0 , задающего начальное состояние поверхности полупроводника, измеряли исходное значение стационарной фотоэдс. Затем к V_0 добавлялось постоянное напряжение ΔV на время $\Delta t = 40 \text{ с}$. Запись величины фотоэдс U_{ph} производилась с момента, предшествующего началу импульса, до окончания ее изменений. Длительность релаксации определялась как время, за которое отклонение фотоэдс от исходного значения на фронтах импульса уменьшалось в 2.7 раза.

Экспериментальные результаты

Релаксационные зависимости фотоэдс структуры $p\text{-Si-SiO}_2$ на частоте модуляции тестового излучения $f = 120 \text{ Гц}$, первоначально находящейся в состоянии обеднения ($V_0 = -1.3 \text{ В}$), приведены на рис. 1. Импульсами положительной полярности структура переводится в состояние инверсии ($\Delta V = 2.0 \text{ В}$ — кривая 1, 3.0 В — кривая 2, 5.0 В — кривая 3). Равновесная зависимость фотоэдс от напряжения смещения для этой МДП структуры приведена на вставке рис. 1, из которой видно, что обеднению соответствуют напряжения смещения в интервале от -1.7 до -0.3 В , обогащению — менее -1.7 В , инверсии — больше -0.3 В . Наличие резкого максимума вблизи области (слабой инверсии)–обеднения на равновесной зависимости фотоэдс от напряжения смещения свидетельствует о высокой плотности поверхностных состояний на границе раздела $p\text{-Si-SiO}_2$. На вставке также показаны условия измерения кривых рис. 1.

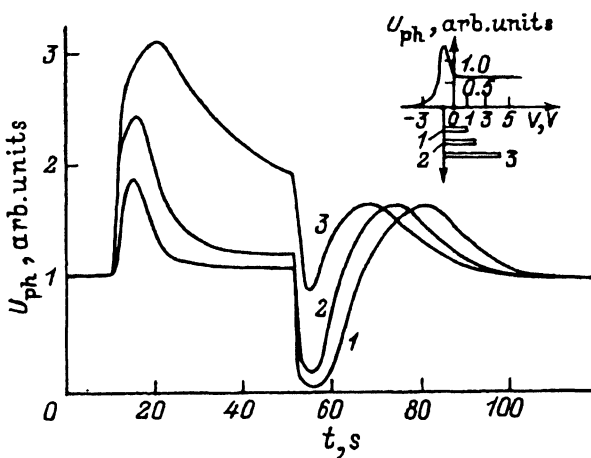


Рис. 1. Релаксация малосигнальной фотоэдс в структуре $p\text{-Si-SiO}_2$ из состояния обеднения поверхности в состояние инверсии и обратно. $V_0 = -1.3 \text{ В}$; ΔV , В: 1 — 2.0, 2 — 3.0, 3 — 5.0. На вставке — равновесная зависимость $U_{ph}(V)$ и режимы измерения кривых $U_{ph}(t)$.

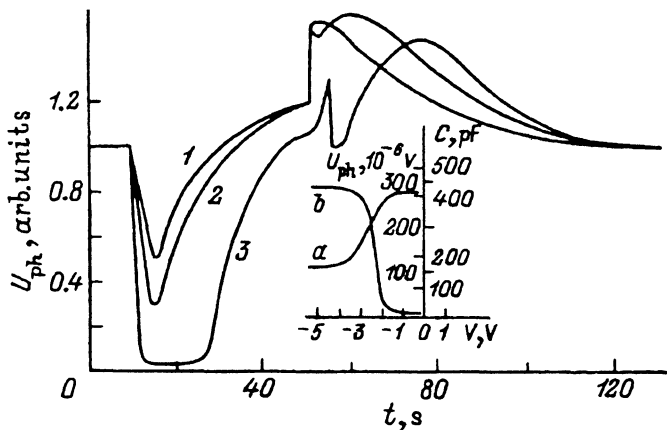


Рис. 2. Релаксация малосигнальной фотоэдс в структуре $n\text{-Si-SiO}_2$ из состояния обеднения в состояние инверсии и обратно. $V_0 = -2.0$ В; ΔV , В: 1 — -1.0 , 2 — -2.0 , 3 — -4.0 . На вставке — вольт-фарадная характеристика (а) и зависимость $U_{ph}(V)$ (b).

Как следует из рис. 1, при включении импульса происходит экспоненциальное возрастание фотоэдс на сотни процентов. Длительность последующей релаксации в течение действия импульса составляет $20 \div 40$ с и зависит от его амплитуды. После выключения импульса происходит резкий спад фотоэдс, затем возрастание и релаксация в течение $40 \div 50$ с. При положительных импульсах малой амплитуды возрастание и спад фотоэдс происходит плавно за $10 \div 30$ с.

На рис. 2 приведены релаксационные зависимости фотоэдс структуры $n\text{-Si-SiO}_2$, находящейся в состоянии обеднения ($V_0 = -2.0$ В) и переводимой импульсом электрического поля в состояние инверсии. Амплитуда прикладываемого импульса отрицательной полярности равна $\Delta V = -1.0$ В для кривой 1, -2.0 В для кривой 2, -4.0 В для кривой 3. Из рисунка видно, что при приложении инвертирующего импульса к обедненной поверхности $n\text{-Si}$ в первый момент происходит резкий спад фотоэдс, а затем она релаксирует к стационарному значению, не соответствующему точно равновесной фотоэдс $U_{ph}(V_0 + \Delta V)$. Длительность релаксации составляет $10 \div 25$ с. При выключении импульса наблюдается возрастание фотоэдс и последующая релаксация в течение $20 \div 40$ с. На вставке рис. 2 приведены вольт-фарадная характеристика, измеренная на частоте 1 МГц, (кривая 1), зависимость фотоэдс от напряжения смещения V при $f = 120$ Гц (кривая 2), полученные для структуры $n\text{-Si-SiO}_2$.

На рис. 3 первоначальное напряжение смещения ($V_0 = 0.5$ В) также соответствует режиму обеднения поверхности. Отрицательными импульсами структура $n\text{-Si-(V}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3\text{-CaO)}$ переводится в режим сильной инверсии ($\Delta V = -2.0$ В — кривая 1, -3.0 В — кривая 2, -4.0 В — кривая 3). На переднем фронте импульса наблюдается резкий спад фотоэдс с последующей релаксацией к стационарному значению в течение $40 \div 50$ с. При выключении импульса фотоэдс резко падает, затем возрастает в течение $15 \div 25$ с. При больших амплитудах импульса на переднем и заднем фронтах фотоэдс уменьшается на большую величину, чем при малых ΔV .

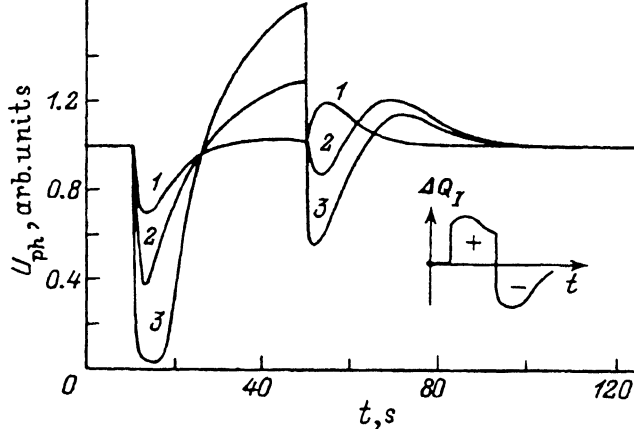


Рис. 3. Релаксация малосигнальной фотоэдс в структуре $n\text{-Si}-(\text{V}_2\text{O}_5-\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO})$ из состояния обеднения в состояние инверсии и обратно. $V_0 = 0.5 \text{ В}$; ΔV , В: 1 — -2.0 , 2 — -3.0 , 3 — -4.0 . На вставке — изменение заряда в диэлектрике в процессе действия импульса.

Таким образом, фотоэдс при подаче импульса электрического поля для всех исследованных структур на переднем и заднем фронтах импульса релаксирует в течение десятков секунд, в то время как длительность релаксации неравновесного обеднения для таких структур $\tau \approx 10^{-2} \text{ с}$. Долговременная релаксация фотоэдс в исследованных МДП структурах не связана с процессами перезарядки входной цепи схемы регистрации, что установлено дополнительными экспериментами, а обусловлена процессами в полупроводнике и прилегающем к нему слою диэлектрика.

Обсуждение результатов

Как показал детальный анализ, релаксацией неравновесного обеднения области пространственного заряда (ОПЗ) [3], созданного импульсом напряжения, нельзя объяснить ни релаксацию длительностью в десятки секунд, ни ее зависимость от полярности импульса и начального состояния поверхности [4]. Из представленных экспериментальных данных можно видеть, что причина возникновения долговременных изменений фотоэдс связана не столько с амплитудой импульса и его полярностью, сколько с его фронтами, где велика скорость изменения напряжения $d(\Delta V)/dt$. Исходя из этого можно заключить, что причиной долговременных изменений фотоэдс является ток перезарядки емкости структуры. Наблюдаемые времена релаксации возможны, если центроид заряда в диэлектрике будет перемещаться в поле импульса со скоростью $v \approx d/\tau = 10^{-5} \text{ см}/2 \cdot 10^1 \text{ с} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ см}/\text{с}$, где d — толщина диэлектрика. Эта величина дрейфовой скорости соответствует коэффициенту диффузии дрейфующих частиц $D > 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$, что не противоречит значениям коэффициентов диффузии заряженных частиц в SiO_2 [5].

Другая особенность, которая обнаруживается при анализе изменения заряда в диэлектрике в течение импульса электрического поля различных амплитуд, состоит в следующем: во всех исследованных

структурах, независимо от исходного состояния поверхности и типа проводимости полупроводника, передний фронт импульса приводит к накоплению положительного, а задний — отрицательного заряда в диэлектрике (см. вставку на рис. 3), причем их инерционность различна.

Это означает, что при подаче на МДП структуру отрицательного импульса на его переднем фронте инжекция электронов из диэлектрика в полупроводник является основным процессом изменения заряда в диэлектрике, который представляет собой сумму отрицательного ($Q_I^{(-)}$) и положительного ($Q_I^{(+)}$) зарядов. Положительная составляющая $Q_I^{(+)}$ через несколько секунд начинает компенсироваться отрицательным зарядом, образующимся за счет инжекции электронов из металлического электрода. На заднем фронте инжекция дырок в диэлектрик прекращается раньше, чем миграция отрицательного заряда к границе полупроводник-диэлектрик.

Если к МДП структуре применен положительный импульс, то на его переднем фронте идет инжекция электронов из полупроводника в диэлектрик и происходит смещение центроида отрицательного заряда к металлическому электроду за счет миграции в поле импульса, что в сумме дает рост составляющей $Q_I^{(+)}$. В момент выключения импульса инжекция прекращается, а отрицательно заряженные ионы постепенно диффундируют к границе с полупроводником, восстанавливая нарушенное импульсом равновесие зарядов в диэлектрике.

Если принять предложенную физическую модель возникновения долговременных изменений фотоэдс, нетрудно получить количественное соотношение между величиной релаксирующей фотоэдс и изменением поверхностного потенциала полупроводника. Из [3] следует

$$U_{\text{ph}}(t) = \frac{kT}{q} \lambda^{-1} \frac{\exp[-y_s(t)]}{\exp[-y_s(t)] + \lambda^{-2}} \delta, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура, q — заряд электрона, δ — уровень инжекции неосновных носителей, λ — уровень легирования, y_s — поверхностный потенциал. Поэтому малое изменение фотоэдс, вызванное малым изменением поверхностного потенциала, может быть найдено отысканием дифференциала выражения (1)

$$dU_{\text{ph}}(t) \simeq U_{\text{ph}}^0 \frac{1}{[\exp(-y_s^0) + \lambda^{-2}]} [-\lambda^{-2} dy_s(t)], \quad (2)$$

где U_{ph}^0 — начальное значение фотоэдс при $y_s = y_s^0$. В эксперименте наблюдается величина

$$U_{\text{ph}}^{\text{exp}}(t) = U_{\text{ph}}^0 + dU_{\text{ph}}(t) \simeq U_{\text{ph}}^0 \left[1 - \frac{\lambda^{-2}}{\exp(-y_s^0) + \lambda^{-2}} dy_s(t) \right]. \quad (3)$$

В свою очередь $dy_s(t)$ определяется из уравнения

$$V_0 + \Delta V(t) = \frac{kT}{q} [y_s^0 + dy_s(y_s^0, t)] + V_I(y_s^0) + dV [Q_{ss}(t)], \quad (4)$$

где y_s^0 — начальное значение поверхностного потенциала, V_I — падение напряжения на диэлектрике, а $dV[Q_{ss}(t)]$ — изменение падения напряжения на диэлектрике, вызванное изменением его зарядового состояния за счет инжекции. Задав механизмы обмена носителями заряда диэлектрика с металлическим электродом и полупроводником, можно определить y_s и по (3) — поведение фотоэдс во времени.

Нами проведен расчет заряда, приведенного к межфазной границе, необходимого для объяснения долговременных изменений фотоэдс при действии электрического импульса. Для этого каждому значению экспериментально измеряемой фотоэдс $U_{ph}(t)$ по выражению (1) ставилось в соответствие значение поверхностного потенциала $y_s(t)$. Затем по (4) и известному закону изменения $y_s(t)$ вычислялось изменение заряда на ловушках диэлектрика $Q_{ss}(t)$. Установлено, что в течение действия импульса происходит изменение заряда, имеющее характер скачка (видимо, за счет поверхностных состояний) и достигающее величины 10^{-10} Кл, а также медленное релаксационное изменение заряда Q_{ss} , описывающее долговременную релаксацию фотоэдс и достигающее на фронтах импульса величины 10^{-11} Кл. Изменению поверхностного заряда на величину 10^{-10} Кл соответствует плотность состояний на границе раздела порядка 10^{11} эВ $^{-1}$ · см $^{-2}$, что близко к экспериментально наблюдаемым плотностям состояний в n -Si-SiO $_2$.

Таким образом, долговременные изменения малосигнальной фотоэдс в исследованных структурах могут быть связаны с обратимым изменением зарядового состояния диэлектрика как за счет инжекции электронов из металлического электрода и дырок из полупроводника на фронтах импульса, так и за счет миграции заряда в диэлектрике. Предполагаемое объяснение причин долговременной релаксации не использует предположения о гетерогенности свойств границы раздела полупроводник — диэлектрик [6,7] или о пространственном удалении ловушек в диэлектрике от границы раздела [8].

Список литературы

- [1] A. Goetzberger, A.D. Lopez, R.J. Strain. J. Electrochem. Soc., **120**, 90 (1973).
- [2] S.K. Lai. Appl. Phys. Lett., **39**, 58 (1981).
- [3] А.В. Войцеховский, В.Н. Давыдов. *Фотоэлектрические МДП структуры из узкозонных полупроводников* (Томск, Радио и связь, 1990).
- [4] О.В. Константинов, О.М. Мезрин. ФТП, **17**, 1656 (1983).
- [5] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. *Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник* (Киев, Наук. думка, 1978).
- [6] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).
- [7] S.N. Kozlov. Phys. St. Sol. (a), **42**, 115 (1977).
- [8] В.Ф. Киселев, С.Н. Козлов, Ю.А. Зарифьянц. В сб.: *Проблемы физической химии поверхности полупроводников*, под ред. А.В. Ржанова (Новосибирск, Наука, 1978) с. 200.

Редактор Л.В. Шаронова

A photo-EMF relaxation in silicon MIS structures stimulated by electric field pulse

V.N. Davydov, S.N. Nesmelov

Tomsk State Academy of Control Systems and Radio Electronics, 634050 Tomsk, Russia

Relaxation of a small-signal photo-EMF under the action of an electrical pulse with duration 40 s and the magnitude range from -5 V to 5 V on MIS-structures n -Si-SiO₂, p -Si-SiO₂, n -Si-(V₂O₅-B₂O₃-CaO) was investigated. Relaxation is likely to be caused by the charge in insulator due to injection of carriers from both the semiconductor and the metal electrodes with subsequent charge migration in the insulator.
