

## МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, УСИЛЕНИЯ ФОТОТОКА И S-ОБРАЗНОЙ ВАХ В ПДП СТРУКТУРАХ

Малик А. И., Гречко В. А., Грушка Г. Г.

Рассмотрен механизм возникновения ряда особенностей в структурах полупроводник—диэлектрик—полупроводник (ПДП). Верхним прозрачным электродом служил тонкий слой высоколегированного широкозонного полупроводникового соединения из смеси оксидов индия и олова (ИТО), а материалом подложки — высокоомный кремний. Описан ряд эффектов, которые наблюдаются при освещении структур, включенных в цепь с источником тока: генерация электрических колебаний, усиление фототока. Представлена физическая модель, описывающая данные эффекты, проведены количественные оценки. Установлено, что основной причиной таких эффектов является наличие в слое диэлектрика сквозных проводящих каналов. Ток основных носителей через эти каналы определяется характеристиками инверсионного слоя на границе раздела диэлектрик—кремний, образованного за счет накопления в этой области фотогенерированных неосновных носителей. S-образная ВАХ анизотропных ПДП структур связывается с инжекцией неосновных носителей заряда из ИТО в кремний и возникновением обратной связи по току вследствие модуляции проводимости подложки. Инжекция обусловлена особенностями энергетической зонной диаграммы анизотропной ПДП структуры, определяющими в свою очередь возможность накопления в приповерхностном слое кремния основных носителей заряда.

Известно, что в структурах типа металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) наблюдается ряд специфических фотоэлектрических эффектов — возрастание КПД фотопреобразования и усиление фототока, что, по мнению авторов [1], является следствием образования у границы раздела полупроводник—диэлектрик неравновесной области обеднения из-за протекания токов «утечки» через диэлектрик. Более интересными структурами для изучения данных эффектов являются структуры, в которых полупрозрачный металлический электрод заменен сильно легированным широкозонным полупроводником, например ИТО [2, 3]. Если ПДП структура состоит из анизотропных полупроводников, наличие широкой запрещенной зоны у верхнего полупроводника, выполняющего роль «окна» для света, обуславливает блокирование тока основных носителей заряда (дырок в случае p-типа подложки) из валентной зоны базового полупроводника. В принципе, это должно улучшать параметры фотопреобразователей, но может также обуславливать появление новых эффектов, например эффекта переключения, описанного в данной работе. При исследовании изотипных ПДП структур нами обнаружен ряд интересных эффектов, описание и анализ которых являются целью данной работы.

### Методика эксперимента

*а. Изотипные структуры.* Изготавливались на основе высокоомного кремния n-типа проводимости с концентрацией основных носителей  $10^{12}—10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Промежуточный слой диэлектрика из двуоксида кремния толщиной 0.02—0.1 мкм создавался на поверхности подложки методом магнетронного вакуумного распыления. Фронтальный слой из ИТО наносился на поверхность диэлектрика этим же методом. Ширина запрещенной зоны ИТО  $E_g=3.2$  эВ, концентрация электронов  $n=10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Фотоактивная площадь структур  $3 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>.

Исследования проводились также и на других высокоомных полупроводниковых материалах, например  $Hg_3In_2Te_6$ . Наиболее четко и повторяемо исследованные в работе эффекты проявлялись в случае кремниевых подложек, поэтому в дальнейшем мы остановимся на анализе кремниевых изотипных ПДП структур.

**б. Анизотипные структуры.** Изготавливались на основе высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости с концентрацией носителей  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . В этих структурах промежуточный слой диэлектрика специально не создавался, однако после операции химико-динамической полировки подложки на ее поверхности присутствовал туннельно-тонкий слой  $SiO_x$ , толщина которого не превышала  $0.003 \text{ мкм}$ . Площадь структур такая же, как и в случае *а*. Толщина слоя  $IT_0$  в обоих случаях составляла  $0.1 \text{ мкм}$ . Стационарная засветка структур осуществлялась с помощью светодиода АЛ-107. Исследование динамической ВАХ проводилось с использованием генератора прямоугольных импульсов напряжения и осциллографа С1-83. Контроль тока осуществлялся на нагрузке  $50 \text{ Ом}$ .

### Результаты исследований

**а. Изотипные ПДП структуры.** Непосредственно после изготовления структуры не обладали сквозной проводимостью и представляли собой ПДП конденсаторы. Заметная сквозная проводимость появлялась после формовки структур

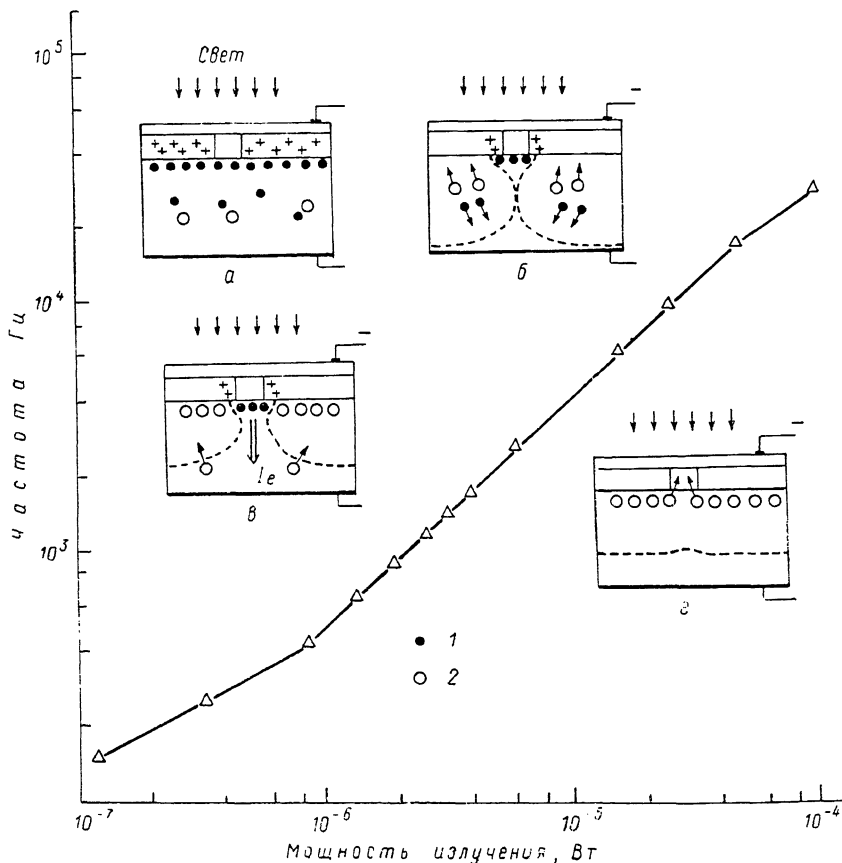


Рис. 1. Зависимость частоты релаксационных электрических колебаний в изотипной ПДП структуре от мощности стационарной засветки.

На вставках — процессы в структуре при наличии в слое диэлектрика сквозного канала. 1 — электроны, 2 — дырки. Ток через структуру  $10^{-8} \text{ А}$ .

путем пропускания через них импульса тока с одновременной засветкой для уменьшения сопротивления высокоомной подложки. Формовка структур привела к образованию в слое диэлектрика сквозных проводящих каналов

диаметр которых был меньше ширины области пространственного заряда (ОПЗ) в подложке. На структурах со сквозной проводимостью при включении их в цепь, содержащую источник напряжения и высокоомный резистор нагрузки,

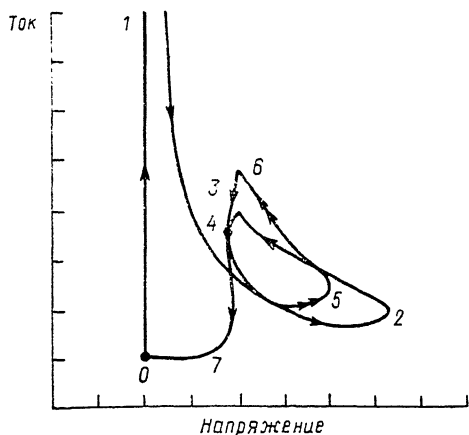


Рис. 2. Динамическая ВАХ изотипной ПДП структуры.

Масштаб: по вертикали —  $10^{-4}$  А/дел, по горизонтали — 5 В/дел.

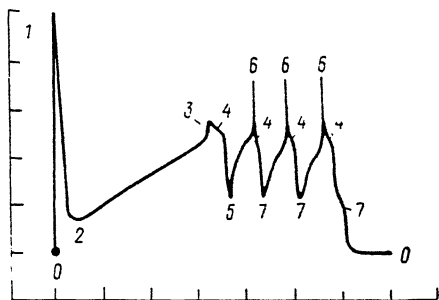


Рис. 3. Осциллограмма тока через ПДП структуру в режиме генерации релаксационных колебаний.

Масштаб: по горизонтали — 100 мкс/дел, по вертикали —  $10^{-4}$  А/дел.

при наличии стационарной засветки наблюдался эффект возникновения релаксационных электрических колебаний, частота которых линейно увеличивалась с ростом мощности стационарной засветки. Данная зависимость приведена на

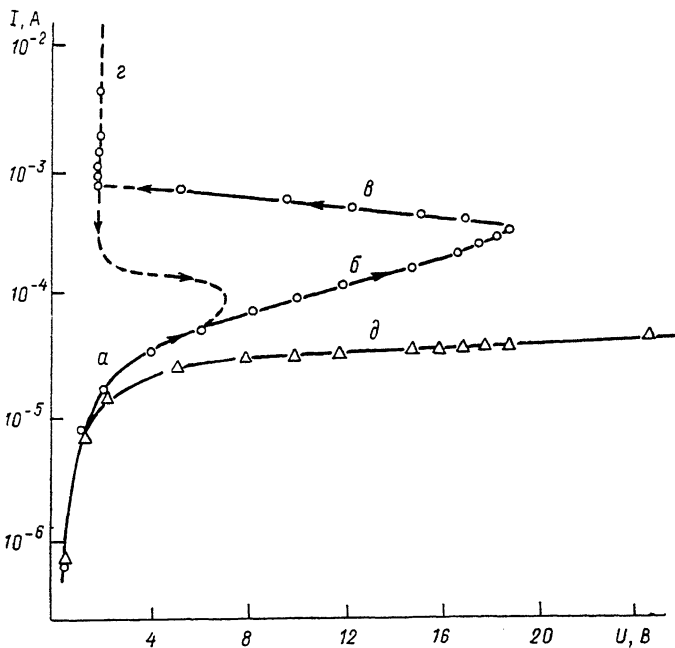


Рис. 4. ВАХ анизотипной ПДП структуры, измеренная на постоянном токе от источника с внутренним сопротивлением  $10^6$  Ом.

ВАХ: а-г — при прямом смещении, д — при обратном.

рис. 1. На рис. 2 приведена динамическая ВАХ структуры при подаче на нее прямоугольного импульса напряжения отрицательной полярности с амплитудой 30 В и длительностью 600 мкс через резистор 100 кОм. Стрелками показано

направление развития процесса. Временное развитие процесса представлено на рис. 3 осциллограммой тока через структуру. Точки, обозначенные цифрами, соответствуют особенностям динамической ВАХ на рис. 2.

На основе рис. 2 и 3 в развитии процесса генерации можно выделить следующие этапы: 0—1 — начальное состояние, в котором структура обладает высокой проводимостью; 1—2 — резкое уменьшение проводимости структуры в начальный момент подачи напряжения; 2—3 — постепенное возрастание проводимости структуры; 3—4 — уменьшение тока через структуру; 4—5 — резкое уменьшение тока; 5—6 — увеличение проводимости и циклическое изменение проводимости по замкнутой кривой 6—4—5—6. . . ; 4—7 — прекращение подачи импульса напряжения; 7—0 — саморазряд структуры.

В случае включения структуры в цепь с источником напряжения и низкоомным резистором нагрузки генерации колебаний не наблюдалось. В этом режиме включения структуры обладали высокими значениями коэффициента усиления фототока. Монохроматическая чувствительность на длине волны 0.85 мкм достигала значения  $10^3$  А/Вт. На коротких длинах волн наблюдалось также высокое значение чувствительности (до 30 А/Вт на длине волны 0.25 мкм).

*б. Анизотипные ПДП структуры.* На прямой ветви ВАХ таких структур (минус на ИТО) наблюдалась отчетливо выраженная S-образная характеристика зависимости тока от приложенного напряжения (рис. 4).

Монохроматическая чувствительность исследованных структур измерялась на длине волны 0.63 мкм при частоте модуляции светового потока 1 кГц и сопротивлении нагрузки  $10^4$  Ом. Исследовался также процесс переключения при импульсной засветке. При включении структуры в запорном направлении ее характеристики подобны обыкновенным высокочувствительным фотодиодам с высоким быстродействием. Характерным для структур с переключением является наличие временной задержки включения. Величина задержки уменьшается как при увеличении смещения на структуре, так и при увеличении энергии импульсного светового потока, с помощью которого производилось включение структур

## Обсуждение результатов

*а. Эффект генерации электрических колебаний и усиления фототока в изотипных ПДП структурах.* Как уже упоминалось ранее, данные эффекты проявляются лишь в том случае, когда в промежуточном слое диэлектрика имеются сквозные проводящие каналы с диаметром, меньшим ширины ОПЗ. Процесс в структуре при наличии стационарной засветки и подаче на прозрачный электрод длинного импульса напряжения отрицательной полярности показаны на вставках к рис. 1. Рассматривается область структуры с одним проводящим каналом в диэлектрике.

Анализ вольтамперных характеристик структур свидетельствовал о наличии при нулевом смещении на границе раздела диэлектрик—кремний области аккумуляции основными носителями (электронами) из-за положительного заряда в диэлектрике на границе раздела с подложкой (рис. 1, а). При подаче импульса напряжения структура из проводящего состояния, обусловленного наличием слоя аккумуляции, переходит в состояние глубокого обеднения (участки 1—2 на рис. 2 и 3). При этом ОПЗ расширяется в объем кремния, но так как потенциал области подложки под проводящим каналом в диэлектрике равен потенциалу слоя ИТО, расширение ОПЗ происходит, как показано на рис. 1, б. Так как поперечный размер проводящего канала мал, то в подложке в области канала сохранится  $n^+$ -слой, который в случае канала с большим размером может иметь форму кольца по периметру канала. В этом случае область подложки под центром канала будет, так же как и в областях под диэлектриком, обеднена основными носителями. Смыкание соседних ОПЗ создает потенциальный барьер для сквозного тока электронов через область канала, вследствие чего ток через структуру уменьшается. Фотогенерированные неосновные носители (дырки) заполняют потенциальную яму вблизи поверхности кремния, возникшую в результате перевода структуры в режим глубокого обеднения. При заполнении ямы дырками структура переходит в режим глубокой инвер-

сии [4]. Время заполнения ямы зависит от плотности монохроматической засветки. Если ее величина составляет  $3.75 \cdot 10^{15}$  фот/см<sup>2</sup>·с, что соответствует мощности стационарной засветки  $3 \cdot 10^{-5}$  Вт (рис. 3), то время, необходимое для заполнения ямы, составляет величину  $3 \cdot 10^{-4}$  с. При оценке времени использовались значения максимально возможной плотности дырок в яме и квантовой эффективности, равные  $10^{12}$  зар/см<sup>2</sup> и 0.8 соответственно. Первое значение взято из работы [5]. Переход структуры в состояние инверсии сопровождается уменьшением поверхностного потенциала на границе диэлектрик—кремний, а следовательно, и ширины ОПЗ, пропорциональной корню из величины поверхностного потенциала [6]. Уменьшение ширины ОПЗ приводит к появлению сквозного тока электронов через канал (рис. 1, в и участок 2—3 на рис. 2 и 3). Нарастание тока электронов  $I_e$  происходит за время  $3 \cdot 10^{-4}$  с, что совпадает по величине со временем заполнения ямы фотогенерированными дырками. Уходу дырок из инверсионного слоя в канал препятствует  $n^+$ -слой в кремнии по периферии канала. Возрастание тока  $I_e$  приводит к увеличению падения напряжения на проводящем канале и к компенсации положительного заряда в диэлектрике по периферии канала. Исчезновение  $n^+$ -области делает возможным появление тока дырок  $I_p$  через канал и прекращение тока  $I_e$  (рис. 1, г). После ухода дырок через канал ток  $I_p$  прекращается,  $n^+$ -область появляется опять, а широкая ОПЗ изолирует канал от объема. В дальнейшем время образования инверсионного слоя зависит от величины  $\tau_s$  — постоянной времени инверсионного слоя, определяющей генерацию дырок в этом слое. Величина  $\tau_s$  зависит от объемной скорости генерации светом дырок и может быть определена из соотношения [6]

$$\tau_s^{об} = \tau_s^* \frac{n_i}{n_i + G\tau_p},$$

где  $\tau_s^*$  — значение  $\tau_s$  без засветки,  $G$  — скорость генерации носителей в объеме кремния,  $\tau_p$  — время жизни неосновных носителей,  $n_i$  — собственная концентрация в кремнии.

Для уровня засветки  $10^{-6}$  Вт величина  $G=6.25 \cdot 10^{16}$  зар/см<sup>3</sup>·с. При этом для  $\tau_p=10^{-6}$  с и  $\tau_s^*=10^{-2}$  с [6] величина  $\tau_s^{об}=2 \cdot 10^{-3}$  с. Фактически эта величина равна периоду колебаний тока при данном уровне стационарной засветки. При этом частота колебаний  $5 \cdot 10^2$  Гц хорошо совпадает с экспериментальной наблюдаемой (рис. 4). Из приведенного выше соотношения следует линейная зависимость частоты колебаний от мощности засветки.

Процесс токопереноса через все каналы в диэлектрике синхронизирован за счет наличия в цепи высокоомного резистора, так как небольшое изменение тока через один из каналов приводит к значительному изменению напряжения на других каналах и способствует развитию в их области вышеописанных процессов.

Увеличение уровня засветки до величины, когда скорость генерации дырок в объеме сравнивается со скоростью их ухода через канал, приводит к срыву генерации и переводу структуры в устойчивое состояние, характеризующееся некоторым средним током  $I_p$  через каналы. При этом структура может быть кратковременно переведена в неустойчивое состояние (когда скорость ухода дырок превышает скорость их генерации), например, путем кратковременного уменьшения уровня стационарной засветки. После уменьшения засветки в структуре происходит нарушение равновесия (вследствие уменьшения тока  $I_p$ ) с последующим развитием процесса, описанного выше. Развитие процесса при уменьшении (импульсном) стационарной засветки на 0.4 % приведено на осциллограмме тока (рис. 5). При импульсном увеличении засветки процесс развивается на заднем фронте импульса. Таким образом, можно на основе ПДП структур реализовать одновибратор, запускаемый световым импульсом.

В случае низкоомной нагрузки обратная связь в цепи по току будет отсутствовать и генерации наблюдаться не будет. Структура без освещения при отрицательном смещении будет находиться в состоянии инверсии, и действие засветки будет приводить к уменьшению величины поверхностного потенциала  $\phi_s$ , а следовательно, и к уменьшению ширины ОПЗ. Сечение канала для сквозного тока электронов будет увеличиваться, и ток  $I_e$  будет возрастать. Изменение  $\phi_s$

при заданном напряжении смещения  $U$  можно оценить из соотношения, которым описывается распределение напряжения на структуре в состоянии инверсии [8]:

$$U = \psi_s + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_i} d_i E_s \approx \frac{\epsilon_s}{\epsilon_i} d_i E_s \approx \frac{\epsilon_s d_i}{\epsilon_i} \sqrt{\frac{2kT p_{n0}}{\epsilon_s}} \exp\left(\frac{q\psi_s}{2kT}\right),$$

где  $d_i$  — толщина диэлектрика,  $E_s$  — напряженность электрического поля на поверхности,  $p_{n0}$  — равновесная концентрация дырок в объеме;  $\epsilon_s$  и  $\epsilon_i$  — диэлектрические проницаемости полупроводника и диэлектрика соответственно.

При освещении структуры происходит увеличение концентрации дырок на величину  $\Delta p = G\tau_p$  и, как следует из вышеприведенного соотношения, уменьшение величины  $\psi_s$ . Для  $N_A = 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, напряжения смещения 10 В, толщины диэлектрика  $5 \cdot 10^{-6}$  см значение  $\psi_s = 0.62$  В. При засветке, соответствующей скорости объемной генерации дырок  $6.25 \cdot 10^{16}$  зар/см<sup>3</sup>·с ( $P = 10^{-6}$  Вт, 0.9 мкм) и времени жизни дырок  $10^{-6}$  с, величина  $\psi_s$  уменьшится до значения 0.41 В. Соответственно произойдет и уменьшение значения ширины ОПЗ с 9 до 7.3 мкм. Так как диаметр и количество каналов в диэлектрике не известны точно, оценка

увеличения тока при уменьшении ширины ОПЗ была проведена на структурах, в которых каналы в диэлектрике и  $n^+$ -области в кремнии под ними создавались

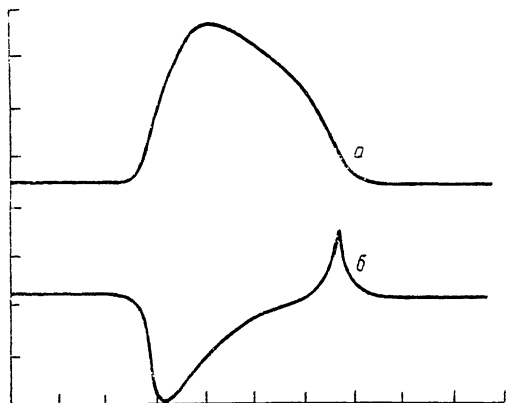


Рис. 5. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) на освещенной ПДП структуре при импульсном уменьшении стационарной засветки на 0.4%.

Масштаб по вертикали: а — 2 В/дел, б —  $10^{-4}$  ( $R_H = 50$  Ом) А/дел; по горизонтали — 5 мкс/дел. Уровень стационарной засветки  $2 \cdot 10^{-4}$  Вт, длительность светового импульсного воздействия 0.5 мкс.

методами фотолитографии и диффузии фосфора соответственно [7]. Сечение каналов составляло величину порядка  $4 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>, а их количество  $\sim 10^3$ . Для оценки примем боковое уменьшение ширины ОПЗ  $\sim 10^{-4}$  см. При этом сечение канала изменится на величину порядка  $4 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>, что соответственно приведет к увеличению тока через канал на  $10^{-6}$  А при напряжении смещения 10 В. С учетом числа каналов общий ток через все каналы составит  $10^{-3}$  А. При этом значение монохроматической чувствительности соответствует величине  $10^3$  А/Вт, что совпадает с экспериментально полученным значением чувствительности.

#### 6. Эффект возникновения S-образной ВАХ в анизотипных ПДП структурах.

В таких структурах из-за большой ширины запрещенной зоны ИТО возможен эффект блокирования тока основных носителей (дырок) из валентной зоны кремния. Наличие дефектов (поверхностных состояний) на границе раздела диэлектрик—кремний приводит к появлению тока основных носителей. Исследование состояния поверхности кремния на границе со слоем ИТО позволило сделать вывод о том, что при нулевом напряжении смещения в приповерхностном слое кремния существует слабо выраженный слой, обогащенный основными носителями. Этим обусловлен квазиомический характер анизотипного гетероконтакта при включении его в прямом направлении. Однако при увеличении тока наблюдается его ограничение, что связано с конечной величиной сечений захвата уровней, через которые происходит рекомбинация дырок из валентной зоны кремния с электронами зоны проводимости ИТО. Накопление дырок на границе раздела существенным образом влияет на распределение напряжения, приложенного к структуре. ВАХ структуры в прямом направлении приведена на рис. 5. Приложенное к структуре напряжение первоначально падает на

<sup>1</sup> Длина проводящего канала в кремниевой подложке принималась равной толщине эпитаксиального слоя (40 мкм).

объеме. ВАХ до значений тока  $\sim 15$  мкА имеет омический участок, на котором значение тока через структуру ограничено сопротивлением объема. При дальнейшем увеличении напряжения происходит ограничение тока и перераспределение напряжения на структуре вследствие накопления на границе раздела дырок.

Образовавшийся в результате накопления слой основных носителей экранирует объем, что приводит к увеличению падения напряжения на границе раздела. Наличие туннельно-тонкого окисла приводит к перемещению уровня Ферми ИТО в направлении к дну зоны проводимости кремния, вследствие чего становится возможной инжекция электронов из ИТО в кремний. Для компенсации заряда неосновных носителей необходимо дополнительное количество дырок, которые вводятся в объем из тыльного  $p^+$ -контакта. Сопротивление падения напряжения на границе раздела, а следовательно, и к увеличению уровня инжекции. Возникает положительная обратная связь по току, наличие которой является необходимым условием возникновения  $S$ -образной ВАХ. Участок  $g$  (рис. 5) соответствует состоянию структуры после переключения ее в низкоомное состояние. Наличие засветки из области фундаментального поглощения кремния приводит к уменьшению величины напряжения включения из-за дополнительной модуляции сопротивления объема. При значении напряжения смещения вблизи напряжения переключения структуры обладали высокими значениями монохроматической чувствительности (до 20 А/Вт на длине волны 0.63 мкм). При импульсном облучении структур переключение их в низкоомное состояние происходило с временной задержкой. Было установлено, что при изменении длительности светового импульса и мощности излучения одну и ту же величину времени задержки можно получить при одинаковой энергии импульса засветки. Это подтверждает предположение о том, что причиной появления  $S$ -образной ВАХ является накопление вблизи границы раздела определенного заряда дырок. Дальнейшие исследования эффекта переключения в анизотипных ПДП структурах позволят сделать определенные количественные оценки по предложенной модели.

**Выводы.** В результате исследования изотипных и анизотипных ПДП структур обнаружен ряд интересных физических явлений. В изотипных структурах с толстым слоем диэлектрика наличие сквозных каналов в диэлектрике является определяющим фактором при объяснении физической природы наблюдаемых эффектов усиления фототока и генерации электрических колебаний в освещенных структурах при обратном смещении. Предложенная физическая модель позволяет более достоверно объяснить результаты работы [3], в которой также наблюдался эффект генерации колебаний в структурах с достаточно толстым слоем диэлектрика, токоперенос через который, на наш взгляд, объясняется также наличием сквозных проводящих каналов, а не наличием точечных дефектов.

Описанные в работе функциональные особенности ПДП структур можно использовать при разработке различных фотоэлектрических устройств на их основе.

#### Список литературы

- [1] Вуль А. Я., Саченко А. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1364—1376.
- [2] Малик А. И., Манассон В. А., Баранюк В. Б. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 10. С. 2071—2074.
- [3] Манассон В. А., Комиссаров Г. П., Шустер Э. М. // Письма ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 1. С. 70—74.
- [4] Jen C. W., Lee C. L., Lei T. F. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. N 10. P. 949—954.
- [5] Богомолов П. А., Сидоров В. И., Усольцев И. Ф. Приемные устройства ИК-систем. М., 1987. 208 с.
- [6] Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1973. 655 с.
- [7] Малик А. И. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 5. С. 119—120.