

Чувствительность структур диэлектрик–полупроводник к нестационарным световым потокам

© Н.Ф. Ковтонюк, В.П. Мисник, А.В. Соколов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт „Комета“», 115280 Москва, Россия

(Получена 28 февраля 2005 г. Принята к печати 9 марта 2005 г.)

Рассмотрена кинетика электронных процессов в структурах металл–диэлектрик–полупроводник, в которых слой диэлектрика обладает небольшой проводимостью. При питании структуры постоянным напряжением в полупроводниковом слое возникает неравновесная обедненная область. Проанализированы условия, необходимые для формирования устойчивой обедненной области и для образования в ней фотоэлектрических сигналов. Приведены оценки длительности переходных процессов и параметров слоев структуры.

В известных фоточувствительных приборах на основе структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) используются „идеальные“ диэлектрические слои с малой удельной электропроводностью ($10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$): приборы с зарядовой связью (ПЗС), приборы с зарядовой инжекцией (ПЗИ), преобразователи изображений на структурах МДП–„жидкий кристалл“ [1]. МДП структуры с утечкой в диэлектрическом слое практически не привлекали внимания исследователей. Тем не менее такие структуры были применены в фотомишенях видеоконф, чувствительных в средней инфракрасной области спектра [2,3]. В фотомишенях видеоконф из-за стекания заряда, внесенного электронным лучом, напряжение на МДП структуре непрерывно уменьшается. В традиционных приборах на МДП структурах [1] источник питания поддерживает на структуре строго определенное напряжение независимо от наличия проводимости в слое диэлектрика. В кинетике электронных процессов в МДП структурах должны быть определенные отличия от аналогичных процессов в фотомишенях, что и является предметом исследования настоящей работы.

В МДП структурах в качестве диэлектрических слоев могут использоваться широкозонные полупроводники с примесями. В этом случае будет образовываться гетеропереход „узкозонный полупроводник“–„широкозонный полупроводник“, который при определенных условиях может обладать свойствами МДП структуры. В качестве диэлектрика могут использоваться также слои окислов металлов и полимерные слои, обладающие требуемой проводимостью. Понятие „слой диэлектрика“ в таких структурах имеет чисто терминологический смысл. В дальнейшем будем пользоваться термином „МДП структура с утечкой“. В статье прежде всего будут рассмотрены структуры, в которых при сравнительно малых напряжениях невозможна инжекция носителей заряда (хотя бы одного знака) через границу диэлектрик–полупроводник.

Поверхностными эффектами, связанными с контактной разностью потенциалов слоев структуры, пренебрежем. Это возможно, так как напряжение на структуре ($> 10 \text{ В}$) существенно больше контактной разности потенциалов.

Распределение заряда, поля и напряжения в слоях МДП структуры с утечкой описывается уравнениями [2,4]

$$\varepsilon_i E_i = 4\pi e n_0 L + 4\pi e N_s - 4\pi \Delta Q_i, \quad (1)$$

$$U = U_s + U_i, \quad (2)$$

$$U_s = \frac{4\pi e n_0 L^2}{\varepsilon_s}, \quad (3)$$

где ε_i , ε_s — диэлектрические проницаемости слоев диэлектрика и полупроводника соответственно, n_0 — концентрация ионизованных примесей в полупроводнике, L — длина обедненной области, N_s — плотность свободных носителей, накапливаемых на границе полупроводник–диэлектрик, ΔQ_i — плотность заряда, проходящего через слой диэлектрика, U — напряжение на слоях структуры, U_s — напряжение на полупроводнике, U_i — напряжение на диэлектрике.

Необходимо найти зависимость длины обедненной области от времени с учетом тока утечки в слое диэлектрика и при подаче на структуру импульса напряжения достаточно большой длительности.

Из уравнений (1)–(3) выражение для напряжения на слоях структуры можно представить в виде

$$U = \frac{4\pi e n_0 L^2}{\varepsilon_s} - \frac{L_i}{\varepsilon_i} (4\pi e n_0 L + 4\pi e N_s - 4\pi e \Delta Q_i). \quad (4)$$

Дифференцируя (4) по времени t и учитывая, что

$$\frac{dN_s}{dt} = GL, \quad \frac{d\Delta Q_i}{dt} = \sigma_i E_i, \quad \frac{dU}{dt} = 0,$$

получим

$$\frac{8\pi e n_0}{\varepsilon_s} L \frac{dL}{dt} + \frac{L_i}{\varepsilon_i} \left(4\pi e n_0 \frac{dL}{dt} + 4\pi e GL - 4\pi \sigma_i E_i \right) = 0, \quad (5)$$

где G — скорость термогенерации в обедненной области, σ_i — удельная электропроводность слоя диэлектрика.

Для упрощения решения уравнения (5) будем считать, что плотность тока в слое диэлектрика не зависит от времени, т. е. $\sigma_i E_i = \text{const}$.

В эксперименте толщина диэлектрика $L_i = 10^{-5}$ см, напряжение на диэлектрике $U_i = 10$ В и поле $E_i \approx 10^6$ В/см. При таких больших полях дрейфовая скорость заряда v_i достигает насыщения ($v_i = \mu_i E_i$) и предположение, что $\sigma_i E_i = en_i v_0 = \text{const}$, вполне правомерно (μ_i — подвижность зарядов в диэлектрике, n_i — их концентрация).

Уравнение (5) можно представить в виде

$$\frac{2en_0\varepsilon_i L}{\varepsilon_s L_i(\sigma_i E_i - eGL)} dL + \frac{en_0}{\sigma_i E_i - eGL} dL = dt. \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (6), получим

$$\frac{2\varepsilon_i}{\varepsilon_s L_i}(L - L_0) + \frac{2\varepsilon_i \sigma_i E_i}{\varepsilon_s L_i eG} \ln \frac{\sigma_i E_i - eGL}{\sigma_i E_i - eGL_0} + \ln \frac{\sigma_i E_i - eGL}{\sigma_i E_i - eGL_0} = \frac{t}{T}, \quad (7)$$

где $T = n_0/G$, L_0 — начальная длина обедненной области.

Для удобства анализа уравнение (7) запишем в виде

$$\frac{\sigma_i E_i - eGL}{\sigma_i E_i - eGL_0} \exp \left\{ \frac{A(L - L_0)}{B} \right\} = \exp \left\{ -\frac{t}{TB} \right\}, \quad (8)$$

где

$$A = \frac{2\varepsilon_i}{\varepsilon_s L_i}, \quad B = \frac{2\varepsilon_i \sigma_i E_i}{\varepsilon_s eGL} + 1.$$

В стационарном режиме ($t \approx \infty$) из (8) получаем

$$\sigma_i E_i - eGL = 0. \quad (9)$$

Это означает, что в стационарном режиме при протекании постоянного тока в МДП структуре в слое полупроводника вблизи границы с диэлектриком сохраняется некоторая обедненная область длиной

$$L_{\text{st}} = \frac{\sigma_i E_i}{eG}. \quad (10)$$

Если удельная проводимость диэлектрика $\sigma_i \approx 10^{-8} - 10^{-9}$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$, $E_i \approx 10^5$ В/см, а скорость термогенерации в полупроводнике $G \approx 10^{19} - 10^{20}$ см $^{-3}$ ·с $^{-1}$, то $L_{\text{st}} \approx 10^{-4} - 10^{-3}$ см.

Используя уравнение (8), можно определить длительность переходного процесса для достижения стационарного значения обедненной области при $L_{\text{st}} \ll L_0$:

$$T_{\text{st}} = \frac{2\varepsilon_i L_0 n_0}{\varepsilon_s L_i G} - \frac{n_0}{G} \left(\frac{2\varepsilon_i \sigma_i E_i}{\varepsilon_s eGL_i} + 1 \right) \ln \frac{\sigma_i E_i - eGL_{\text{st}}}{\sigma_i E_i - eGL_0}. \quad (11)$$

Если ток в диэлектрике мал настолько, что выполняются неравенства $\sigma_i E_i \ll eGL_i$, $\sigma_i E_i \ll eGL_{\text{st}}$, $\sigma_i E_i \ll eGL_0$, $L_{\text{st}} \ll L_0$, $L_i \ll L_0$, то из (12) получим

$$T_{\text{st}} = \frac{2\varepsilon_i L_0 n_0}{\varepsilon_s GL_0} - \frac{n_0}{G} \ln \frac{L_{\text{st}}}{L_0} \approx \frac{2\varepsilon_i L_0 n_0}{\varepsilon_s L_i G}. \quad (12)$$

Первый член в формуле (12) совпадает с аналогичной зависимостью для вычисления переходного процесса,

полученной для МДП структуры с „идеальным“ диэлектриком [3]. Из формул (11) и (12) видно, что при использовании в МДП структуре диэлектрика с утечкой время переходного процесса уменьшается на величину, определяемую вторым членом в (11), (12).

Определим зависимость длины обедненной области от времени для условий, при которых $eGL \gg \sigma_i E_i$, $L \ll L_0$. При этом из уравнения (8) получим

$$\frac{L}{L_0} \exp \left\{ -\frac{AL_0}{B} \right\} = \exp \left\{ -\frac{t}{TB} \right\}. \quad (13)$$

Если $\sigma_i E_i \ll eGL_0$, то $B = 1$ и из уравнения (13) зависимость $L(t)$ можно представить в виде

$$L(t) = L_0 \exp \left\{ -\left(\frac{t}{T} - \frac{2\varepsilon_i L_0}{\varepsilon_s L_i} \right) \right\}. \quad (14)$$

Приравнявая в (14) показатель экспоненты единице, получим, что обедненная область уменьшается в 2.7 раз за время

$$t_H = \left(\frac{2\varepsilon_i L_0}{\varepsilon_s L_i} + 1 \right) T. \quad (15)$$

Если $L_0 \gg L_i$, $\varepsilon_i \approx \varepsilon_s$, то $t_H = (2L_0/L_i)T$.

Изменение фотогенерационного тока I_P в структуре можно определить по формуле

$$I_P = eG_P L S_e = eGS_e L_0 \exp \left\{ -\left(\frac{t}{T} - \frac{2\varepsilon_i L_0}{\varepsilon_s L_i} \right) \right\}, \quad (16)$$

где G_P — скорость фотогенерации, S_e — площадь фоточувствительного элемента.

Вывод, вытекающий из формул (8)–(10), о существовании в узкозонном полупроводнике МДП структуры с утечкой неравновесной обедненной области при постоянном напряжении на структуре представляет определенный практический интерес. Рассмотрим возможные физические процессы, приводящие к образованию такой области. В МДП структурах появление неравновесной обедненной области при включении импульса напряжения общеизвестно. Образование и сохранение обедненной области при постоянном напряжении на структуре возможно при выполнении определенных условий.

Это прежде всего отсутствие инжекции свободных носителей (хотя бы одного знака) из диэлектрика с утечкой в узкозонный полупроводник. Электроны, проходя слой диэлектрика, останавливаются на границе раздела. Из объема полупроводника к границе раздела должны подойти дырки, в результате чего произойдет нейтрализация границы. Однако в нашем случае выбран полупроводник электронного типа, в котором практически нет свободных дырок. Поэтому поле проникает в полупроводник, отталкивает равновесные электроны от границы и образуется обедненная область, в которой возникает термогенерация электронно-дырочных пар. Если термогенерационный ток неосновных носителей в полупроводнике больше тока утечки в диэлектрике, то через время T_{st} обедненная область практически

исчезает. Когда термогенерационный ток соизмерим с током в диэлектрике или меньшего ($eGL \leq \sigma_i E_i$), неравновесная обедненная область до нуля не уменьшается и продолжает оставаться, пока на структуре имеется постоянное напряжение. Термогенерационный ток дырок в сторону границы не успевает компенсировать приток к границе электронов, и в приграничный слой полупроводника проникает электрическое поле, отталкивающее основные носители от границы.

Подобное неравновесное обеднение наблюдалось в фоточувствительных полупроводниковых структурах при эксклюзии неосновных носителей, а в фотодиодах — при экстракции [5]. Эксклюзионный контакт (гомопереход, образованный слоями сильно легированного полупроводника и того же полупроводника со свойствами, близкими к свойствам собственного) пропускает поток основных носителей и одновременно не инжектирует неосновные носители, что в конечном итоге приводит к образованию стационарной неравновесной обедненной области. В работе [5] показано, что фотоприемники, основанные на явлении эксклюзии, имеют более низкий уровень собственных шумов и более высокую рабочую температуру по сравнению с традиционными фоторезистивными приемниками.

Рассмотрим реакцию структуры на воздействие световых импульсов, при которых фотогенерационный ток $eG_P L_s e \gg \sigma_i E_i$. В этих условиях поток зарядов, проходящих через диэлектрик, не успевает компенсировать заряд неосновных носителей, накапливаемых на границе, eN_s и толщина стационарной области со временем будет уменьшаться до нового значения, меньшего L_{st} . Это в свою очередь приведет к уменьшению величины фототока до нового значения, определяемого, согласно формуле (10), суммарной скоростью термо- и фотогенерации. Следовательно, в цепи будет наблюдаться импульс фототока, который, несмотря на наличие освещения, через некоторое время уменьшится до величины, несколько большей темного стационарного тока.

По существу при подсветке МДП структуры, питаемой постоянным напряжением, происходит перераспределение напряжения со слоя полупроводника на слой диэлектрика, что сопровождается возникновением импульса фототока, который затухает по мере установления нового стационарного распределения напряжения. Если импульс света прекращается, то со временем заряды, проходящие через диэлектрик, скомпенсируют накопленный заряд, длина стационарной обедненной области примет первоначальное значение и структура снова может зарегистрировать импульс света.

В экспериментальных работах [6,7] в МДП структурах с уткой осуществлялась регистрация нестационарных излучений. Однако теория явления не была полностью понятна. Проведем сравнение приведенных выше результатов теоретического анализа с экспериментальными результатами работ [6–8].

Исследовались МДП структуры на основе кремния с удельным сопротивлением при комнатной температуре

$\sim 3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В качестве диэлектрика напылялись слои двуокиси титана и двуокиси кремния с удельным сопротивлением $\sim (10^8 - 10^9) \text{ Ом} \cdot \text{см}$, толщиной 10^{-5} см . Площадь структур составляла $\sim 1 \text{ мм}^2$. При подаче постоянного напряжения $\sim 30 \text{ В}$ в структурах возникает ток плотностью $\sim 10^{-2} \text{ А/см}^2$, что соответствует удельному сопротивлению диэлектрика $\sim 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В качестве источника импульсного излучения использовались светодиоды из арсенида галлия.

При подаче прямоугольного импульса света длительностью $\sim 10^{-4} \text{ с}$ на переднем фронте наблюдается довольно резкий всплеск фототока, который через некоторое время (10^{-5} с) затухает, несмотря на то что импульс света продолжает действовать. Это означает, что структура реагирует только на нестационарное излучение. Затухание фототока происходит по экспоненциальному закону, постоянная времени которого тем меньше, чем больше мощность импульсов света, что согласуется с формулами (15) и (16). При воздействии последующих импульсов света ситуация повторяется. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая в данной статье теория достаточно хорошо согласуется с экспериментом.

Соответствующие осциллограммы импульсов фототока (см. рис. 1 работы [6]) в различных режимах функционирования МДП структур с уткой опубликованы в работах [6–8], и в настоящей статье нет необходимости их повторять.

Уровень собственных шумов фотоприемника определяется в основном величиной темного тока. В рассматриваемой МДП структуре темновой ток задается удельной проводимостью диэлектрика σ_i , которую при требуемой величине L_{st} можно определить по формуле (10)

$$\sigma_i = \frac{eGL_{st}}{E_i}. \quad (17)$$

Проведем по формуле (17) численный расчет требуемой удельной проводимости диэлектрического слоя МДП структур из узкозонных полупроводников (арсенид индия, антимонид индия), чувствительных в средней инфракрасной области спектра (2.5–5.5 мкм). Для достижения достаточно большого квантового выхода в этой области спектра требуется, чтобы длина стационарной обедненной области L_{st} была $\sim (5-10) \text{ мкм}$. В этих полупроводниках при температуре жидкого азота скорость термогенерации $G \approx 10^{17} - 10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ [7]. В экспериментах [4,6,7] напряжение на структуре $\geq 10 \text{ В}$, толщина диэлектрика 10^{-5} см и $E_i = 10^6 \text{ В/см}$. Подставляя эти значения в формулу (16), получим, что σ_i может изменяться в следующих пределах $\sim (10^{-7} - 10^{-10}) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

При этом имеется возможность подобрать минимальное значение удельной проводимости диэлектрического слоя, необходимое для образования в узкозонном полупроводнике требуемого размера обедненной области, т.е. появляется возможность оптимизировать величину шумового тока.

Что касается рабочей температуры рассматриваемых МДП фотоприемников, то здесь справедливы выводы работ [2,3,5] о том, что при наличии в фоточувствительной структуре неравновесной обедненной области рабочая температура фотоприемников выше, чем в традиционных фоторезисторах.

Так как МДП структура с питанием постоянным напряжением не реагирует на стационарные световые потоки, то на входе следует использовать специализированные модуляторы света. Если сигнальный световой поток по каким-то причинам уже промодулирован (например, в лазерных измерителях дальности и в активных оптических локаторах), а фоновое излучение стационарно, то сигнал фона отсутствует в измеряемом фототоке и пороговая чувствительность ограничивается суммарным шумом темного тока и фона.

В заключение отметим, что при подаче на МДП структуру с утечкой постоянного напряжения в приграничном полупроводниковом слое возникает фоточувствительная неравновесная обедненная область, длина которой определяется отношением плотности тока утечки в диэлектрике к скорости термогенерации в полупроводнике. Такие структуры обладают фоточувствительностью к импульсным световым потокам и нечувствительны к стационарным воздействиям света. Уровень шумов в МДП структурах с утечкой определяется током в слое диэлектрика и может быть сведен к минимальному значению подбором параметров слоев структуры.

Список литературы

- [1] Н.Ф. Ковтонюк, Е.Н. Сальников. *Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений* (М., Радио и связь, 1990) гл. 4, с. 106.
- [2] Н.Ф. Ковтонюк, В.П. Мисник. РЭ, **47** (9), 1145 (2002).
- [3] Н.Ф. Ковтонюк, В.П. Мисник, А.В. Соколов. Оптич. журн., **71** (5), 17 (2004).
- [4] Н.Ф. Ковтонюк, Г.Н. Савков, Л.И. Ванина. ФТП, **9** (6), 1208 (1975).
- [5] T. Ashley, C.T. Elliott, A.T. Harker. *Infr. Phys.*, **26** (5), 303 (1986).
- [6] Н.Ф. Ковтонюк, В.А. Морозов, В.Г. Фадин, П.А. Богомолов, Ю.Б. Алисултанов, И.С. Потапов. ФТП, **6** (3), 575 (1972).
- [7] Н.Ф. Ковтонюк, В.А. Морозов. РЭ, **18** (2), 430 (1983).
- [8] Н.Ф. Ковтонюк, Г.Н. Савков, А.И. Веров, Л.И. Ванина. *Микроэлектроника*, **5** (2), 196 (1976).

Редактор Л.В. Шаронова

Sensitivity of insulator–semiconductor structures to non-stationary light fluxes

N.F. Kovtonyuk, V.P. Misnik, A.V. Sokolov

Federal State Unitary Enterprise
«Central Research Institute „Kometa“»,
115280 Moscow, Russia

Abstract This paper deals with the kinetics of electronic processes in the metal–insulator–semiconductor structures with an insulator layer having small conductivity. The nonequilibrium depletion region is formed in the semiconductor layer when this structure is fed by DC voltage. The conditions required to form steady depletion region and generate photoelectric signal in it are analyzed. The estimates of transient times and the parameters of structure layers are given.