

Рис. 3. Визуализированные волновые фронты для разных фазовых объектов: сферической линзы (а) и пластинки с переменной толщиной (б)

лянной пластинки с произвольно меняющейся толщиной (б). Оценивая полученные изображения, следует иметь в виду, что в выходном сигнале приемников присутствовала постоянная составляющая, которая после интегрирования давала линейный рост напряжения.

Таким образом, проведенные исследования показали, что на основе АО-взаимодействия можно создать эффективные датчики волнового фронта, сочетающие высокое пространственное и угловое разрешение с большой скоростью обработки информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакшии В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики.— М.: Радио и связь, 1985.
2. Балакшии В. И., Парыгин В. Н., Упасена Х. А. О возможности регистрации фазовой структуры светового поля акустическим методом // Квантовая электрон.— 1981.— 8, № 4.
3. Балакшии В. И. Анализ и синтез объемных изображений // Радиотехника и электроника.— 1982.— 27, № 7.
4. Балакшии В. И., Кукушкин А. Г., Торговкин М. Ю. Регистрация фазовой структуры светового поля с использованием селективных свойств анизотропной брэгговской дифракции // Радиотехника и электроника.— 1987.— 32, № 4.
5. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов.— Л.: Машиностроение, 1983.

Поступила в редакцию 19 января 1990 г.

УДК 621.383

В. Б. ЗАЛЕСКИЙ, А. Ю. КУЛИКОВ, С. А. МАЛЫШЕВ, В. Р. ПАН
(Минск)

КИНЕТИКА ИМПУЛЬСОВ ФОТООТВЕТА ЛАВИННЫХ МДП-ФОТОПРИЕМНИКОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ СМЕЩЕНИЯ

Одним из наиболее перспективных видов фотоприемных элементов для систем автоматики и связи, обеспечивающих высокие значения чувствительности и быстродействия среди твердотельных приборов с внутренним усилением, являются лавинные фотодиоды.

В ряде работ [1—4] рассмотрены лавинные МДП-фотоприемники, в которых в значительной степени устранены недостатки, присущие лавинным $p-n$ -фотодиодам, такие, как микроплазменный характер пробоя и необходимость высокой стабилизации питающего напряжения и температуры, и сочетаются высокая пороговая чувствительность и коэффициент усиления фототока с низкими требованиями к стабильности напряжения питания [1]. Следует отметить, что лавинные МДП-фотоприемники такого типа работают в импульсном режиме, при этом фор-

мируемый подзатворный диэлектрик обладает пренебрежимо малой проводимостью и при рассмотрении теоретических моделей величина проводимости диэлектрика, как правило, принимается равной нулю [2, 3]. В последнее время возник интерес к структурам, которые могут работать при постоянном смещении за счет наличия подзатворного резистивного слоя конечной проводимости [5].

В этой связи рассмотрение кинетики формирования фототока в лавинном МДП-фотоприемнике представляется достаточно интересным, так как позволит выработать конкретные рекомендации при их разработке.

Цель данной работы — теоретическое и экспериментальное исследования влияния электрофизических параметров МРП-структуры с подзатворным резистивным слоем на кинетику импульса фототока в лавинном режиме.

Как и в случае подзатворного диэлектрика [2], для вывода аналитических соотношений введем следующие допущения: 1) легирующая примесь распределена равномерно по объему полупроводника; 2) рекомбинацией носителей в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника можно пренебречь; 3) толщина инверсионного слоя на границе раздела диэлектрик — полупроводник пренебрежимо мала; 4) подвижные носители не оказывают влияния на распределение электрического поля в ОПЗ полупроводника, которое идентично распределению поля в резком $p-n$ -переходе; 5) коэффициент лавинного умножения существенно больше единицы. Данные допущения в достаточной степени удовлетворяются в диапазонах рассматриваемых параметров, представляющих практический интерес.

В общем случае задача прохождения тока в МРП-структуре сводится к совместному использованию уравнения непрерывности и уравнения Пуассона, решая которые можно записать соотношения для полного падения напряжения

$$U(t) = (ePW - Q_{ин})/C_d + \varphi_s + ISR \quad (1)$$

и плотности тока в квазинейтральной области полупроводника

$$I = i_t M + ePdW/dt, \quad (2)$$

где e — заряд электрона; P — концентрация примеси акцепторов (или в случае полупроводника n -типа — доноров) в подложке; W — ширина ОПЗ; $Q_{ин}$ — плотность заряда инверсионного слоя на единицу площади; C_d — удельная емкость диэлектрика; φ_s — поверхностный потенциал полупроводника; S — площадь структуры; R — сопротивление нагрузки; t — время; M — коэффициент умножения темнового лавинного процесса, который с учетом соотношения Миллера можно представить в виде

$$M = [1 - (\varphi_s/\varphi_n)^m]^{-1}, \quad (3)$$

где φ_n — поверхностный потенциал полупроводника, при котором $M = \infty$; m — постоянный для данной концентрации примеси коэффициент. Первое слагаемое в уравнении (1) представляет собой падение напряжения на диэлектрике (U_d), а третье — на сопротивлении нагрузки (U_r). В уравнении (2) первое слагаемое учитывает лавинную составляющую ($I_{л}$) полное тока, второе — составляющую, обусловленную изменением ширины ОПЗ.

В режиме неравновесного обеднения поверхностный потенциал описывается выражением

$$\varphi_s = ePW^2/2\epsilon_s\epsilon_0, \quad (4)$$

где ϵ_s — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Следующее выражение учитывает то обстоятельство, что скорость изменения заряда инверсионного слоя определяется притоком носителей, образовавшихся вследствие ударной ионизации, и их оттоком через резистивную диэлектрическую пленку:

$$dQ_{ин}/dt = -i_t M + i_c, \quad (5)$$

где i_c — плотность сквозного тока неосновных носителей через диэлектрик. Его величина для стационарного случая составляет Uag_e (g_e — компонента проводимости пленки диэлектрика единичной площади для потока электронов).

Таким образом, уравнения (1)–(5) составляют полную систему, описывающую протекание лавинного процесса в МРП-структуре. Учитывая условие $M \gg 1$, соотношение (5) может быть записано в следующем виде: $M \approx \varphi_n/m(\varphi_n - \varphi_s)$. Погрешность такого приближения при $M > 10$ и $m = 3$ составляет менее 5%. Далее, дифференцируя уравнение (1) по времени и исключая члены $Q_{ин}$, φ_s и W , получаем

$$\begin{cases} \tau d(i_\tau/I_\pi)/dt = (mRS/\varphi_n)(I - i_c + \tau dI/dt - C_d dU/dt), \\ \tau(di_c/dt) = g_{ed}RS(I - i_c), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$I_\pi = I + \varepsilon_s \varepsilon_0 / C_d W_n (I - i_c + \tau dI/dt - C_d dU/dt),$$

$$C_s = \varepsilon_s \varepsilon_0 / W_n,$$

C_s — емкость ОПЗ полупроводника; W_n — ширина ОПЗ, соответствующая поверхностному потенциалу φ_n ; g_{ed} — компонента дифференциальной проводимости диэлектрической пленки, значение которой может отличаться от g_e , $\tau = RSC_d$.

Данные соотношения позволяют получить выражение для формы импульса фототока. Для этого предположим, что на МРП-структуру подается постоянное напряжение питания, величина которого достаточна для образования лавинного процесса. В момент времени $t = 0$ на структуру подается световой поток постоянной малой интенсивности. При этом полный, лавинный, сквозной и темновой токи получают малые приращения и их можно представить в виде $I = I_0 + \Delta I$; $I_\pi = I_{\pi 0} + \Delta I_\pi$; $I_c = I_{c0} + \Delta I_c$; $i_\tau = i_{\tau 0} + \Delta i_\tau$. Далее из (6) с учетом того, что $I_0 = I_{\pi 0} = I_{c0}$; $\Delta i_\tau = g_{hd}/g_{ed} \Delta I_c$ (g_{hd} — компонента дифференциальной проводимости диэлектрической пленки для дырок), нетрудно получить следующее дифференциальное уравнение:

$$\tau_3 d^3 \Delta I / dt^3 + A \tau^2 d^2 \Delta I / dt^2 + B \tau d \Delta I / dt = 0,$$

где

$$A = 1 + g_{ed}RS + C_d/C_s [1 + (I_0^2/i_{\tau 0})(mRS/\varphi_n)], \quad (7)$$

$$B = C_d/C_s [(I_0^2 mRS/i_{\tau 0} \varphi_n)(1 + g_{ed}RS + g_{ed}RS - g_{hd}RS I_0/i_{\tau 0})].$$

Начальные условия для решения уравнения (7) имеют вид

$$\Delta I(0) = 0,$$

$$\tau d \Delta I(0) / dt = C_d J_0 i_\Phi / C_s i_{\tau 0}. \quad (8)$$

Второе из них найдено с помощью соотношения для лавинной составляющей тока из (6) с учетом того, что ее изменение в момент времени $t = 0$ составляет $\Delta I_\pi = M i_\Phi = I_{\pi 0} i_\Phi / i_{\tau 0}$. Таким образом, с учетом (8) решение запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta I = (i_\Phi I_0 / i_{\tau 0}) (C_d g_{ed} RS / C_s B) \{ & 1 + \tau_2 / (\tau_2 - \tau_1) [\tau / g_{ed} RS \tau_2 - 1] e^{-t/\tau_2} - \\ & - [\tau_1 / (\tau_2 - \tau_1)] [\tau / g_{ed} RS \tau_1 - 1] e^{-t/\tau_1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\tau_1 = \tau [A/2 + \sqrt{A^2/4 - B}]^{-1},$$

$$\tau_2 = \tau [A/2 - \sqrt{A^2/4 - B}]^{-1}.$$

Анализ полученного соотношения показывает, что после первоначального резко возрастающего участка (передний фронт определяется постоянной времени τ_1) должно наблюдаться падение фототока (с постоянной времени τ_2) до некоторого стационарного значения, соответствующего новому устойчивому состоянию (рис. 1, а, кривая I). Такое поведение

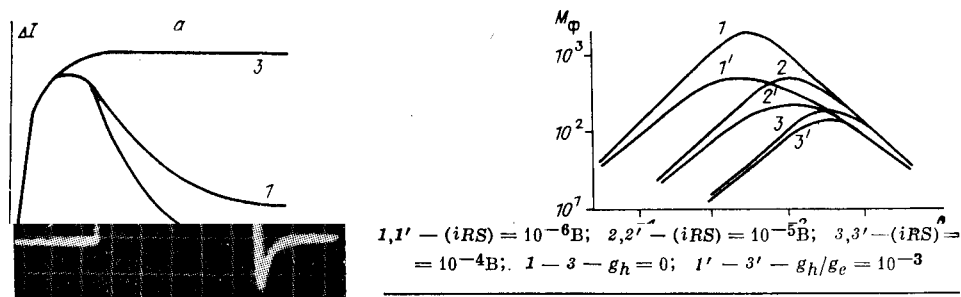


Рис. 1. Форма импульса фототока при конечном g_e (1), $g_e \rightarrow 0$ (2), $g_e \rightarrow \infty$ (3); (а); динамика импульса фототока МДП-структуры с проводящим диэлектриком в лавинном режиме при постоянном напряжении смещения: $U = 70$ В (б). Коэффициент усиления $\sim 10^3$, скорость горизонтальной развертки 50 мкс/дел.

фототока объясняется падением поверхностного потенциала (а следовательно, и коэффициента лавинного умножения) за счет накопления инверсионного слоя на границе раздела, вследствие чего происходит уменьшение как непосредственно составляющей фототока, так и темновой составляющей. Время, за которое фототок достигает максимума, составляет

$$t_{\max} = [\tau_1 \tau_2 / (\tau_2 - \tau_1)] \ln \{ (\tau / \tau_1 - g_{ed} RS) / (\tau / \tau_2 - g_{ed} RS) \}. \quad (10)$$

Такое поведение фототока является промежуточным между двумя предельными случаями. Первый соответствует обычной МДП-структуре с непроводящим окисным слоем, т. е. $g_e = g_{ed} = g_h = g_{hd} = 0$. При этом постоянная составляющая в соотношении (9) отсутствует, а форма фототока (см. рис. 1, а, кривая 2) полностью соответствует режиму устойчивого лавинного процесса [4], когда на МДП-структуру подается линейно нарастающее напряжение с крутизной α , а ток I_0 составляет величину αC_0 . Второй предельный случай имеет место, когда проводимость окисного слоя устремляется к ∞ , что соответствует обычному фотоприемнику с $p-n$ -переходом, нагруженным на внешнее сопротивление R . Зависимость фототока от времени при этом принимает классический вид, присущий фотоприемникам без обратной электрической связи (см. рис. 1, а, кривая 3).

С целью установления других особенностей усиления фототока в МРП-структурах с проводящим диэлектриком в соответствии с (9) и (10) были произведены численные расчеты, результаты которых представлены на рис. 2. При этом предполагалось, что темновой генерационный ток, инициирующий лавинный процесс, имеет две составляющие. Первая из них (i) обусловлена термополевой генерацией электронно-дырочных пар в объеме полупроводника и на границе раздела и не зависит от времени. Вторая составляющая представляет собой поток дырок, движущихся от металлического электрода через диэлектрик и инжектируемых электрическим полем в полупроводник. Ее величина определяется напряжением на диэлектрической пленке и может быть представлена в виде $g_h I_c / g_e$. Кроме того, считалось, что $g_e = g_{ed}$ и $g_h = g_{hd}$. Из рисунка видно, что вторая особенность усиления фототока в таких структурах заключается в «куполообразной» зависимости коэффициента усиления ($M_\phi = \Delta I(t_{\max}) / i_\phi$) от величины напряжения $U_r = I_0 R S$, создаваемого на сопротивлении нагрузки сквозным током через диэлектрик в стационарном режиме и однозначно определяемого внешним смещением. Максимально реализуемое значение M_ϕ определяется как величиной произведе-

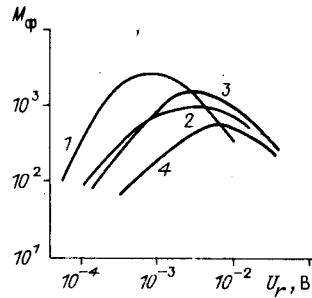


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента усиления фототока МДП-структур с проводящим диэлектриком от величины напряжения U_r :

1 — $R = 10$ кОм, $S = 0,1$ мм²; 2 — $R = 100$ кОм, $S = 0,1$ мм²; 3 — $R = 10$ кОм, $S = 1$ мм²; 4 — $R = 100$ кОм, $S = 0,1$ мм² + фоновая засветка

дения iRS , так и дырочной компонентой проводимости диэлектрика g_h . Электронная компонента проводимости g_e какого-либо ощутимого влияния на данную характеристику не оказывает. После подстановки (10) в (9) и исследования коэффициента усиления как функции от переменной U_r нетрудно установить, что оптимальное значение $U_r^{\text{опт}}$, соответствующее максимуму рассматриваемой зависимости, составляет величину

$$U_r^{\text{опт}} = \sqrt{(1 + C_s/C_d) \varphi_n iRS/m}, \quad (11)$$

зависящую только от произведения iRS .

Экспериментальные исследования проводились на образцах лавинных МРП-фотоприемников, сформированных на подложках монокристаллического кремния p -типа ориентации (100) и с концентрацией примеси $2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. В качестве резистивного слоя использовали двуокись кремния толщиной $0,15 \div 0,2$ мкм, полученную методом пиролитического разложения тетраэтоксисилана при 600 К. В качестве полевого электрода использовались пленки никеля, нанесенные термическим распылением через маску. Измерения кинетики фотоответа проводились на установке, описанной в [1]. Источником световых импульсов служил светодиод АЛ310А с длиной волны $\lambda = 0,68$ мкм и передним фронтом нарастания не хуже 30 нс.

Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими. Так, форма импульса фотоответа соответствует описанной выше (рис. 1, б). Зависимость коэффициента усиления от напряжения U_r (а следовательно, и от величины внешнего смещения) также имеет «куполообразную» форму с максимумом (рис. 3). Увеличение сопротивления нагрузки R (кривые 1, 2) или площади структуры S (кривые 1, 3) в 10 раз приводит к уменьшению максимума зависимости $M_\phi(U_r)$ и его сдвигу по оси абсцисс приблизительно на полпорядка, что находится в соответствии с (11).

К аналогичным изменениям (кривые 2, 4) приводит увеличение составляющей темнового генерационного тока i , инициирующего лавинный процесс, которое имитировалось введением подсветки МРП-структуры с постоянной интенсивностью дополнительного светодиода. Рассчитанные в соответствии с (9)–(11) значения $U_r^{\text{опт}}$ и $M_\phi(U_r^{\text{опт}})$ и наблюдаемые экспериментально (кривая 4) отличаются не более чем в 2 раза. При этом значение составляющей, которая в данном случае является доминирующей, измерялось в импульсном режиме работы светодиода при напряжении на МРП-структуре, недостаточном для образования лавинного умножения, m принималось равным 0,3 [4], а остальные константы определялись экспериментально аналогично тому, как это описано в [2]. Сравнить экспериментальные кривые 1–3 с теоретическими не представляется возможным из-за отсутствия данных о составляющих темнового генерационного тока.

В заключение следует отметить еще один важный момент, связанный с выбором проводимости резистивной пленки. С одной стороны, для достижения максимального значения коэффициента умножения необходимо, чтобы сквозной ток через нее составлял величину $U_r^{\text{опт}}/R$. Для достаточно низкой проводимости такого слоя это условие будет выполнять-

ся лишь при больших внешних смещениях, что приведет к его пробую. С другой стороны, увеличение его проводимости вызовет рост дырочной составляющей сквозного тока, а следовательно, и уменьшение коэффициента усиления. Поэтому оптимальной проводимостью резистивной пленки можно считать такую, при которой данное значение сквозного тока устанавливается при напряжении возникновения лавинного процесса. Нетрудно установить, что в этом случае удельная проводимость пленки составляет

$$\sigma = g_e d = di(1 + C_d/C_s)/2mU_r^{\text{опт}}$$

(d — толщина окисла), а наиболее интересный с практической точки зрения ее диапазон находится в пределах d ($10^{-6} \div 10^{-4}$) $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Таким образом, впервые получено аналитическое выражение, описывающее форму импульса фотоответа лавинного МРП-фотоприемника с проводящим окисным слоем при постоянном напряжении смещения, на основании которого установлены такие основные особенности усиления фототока, как «куполообразная» зависимость коэффициента усиления от величины напряжения U_r на сопротивлении нагрузки (а следовательно, и от величины смещения) в стационарном режиме, влияние исходных электрофизических параметров МРП-структуры, ее площади и сопротивления нагрузки на максимально достижимое значение коэффициента усиления и величину напряжения U_r , при котором такое усиление реализуется. Получено соотношение для оптимального значения компоненты электронной проводимости окисной пленки. Продемонстрировано хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке оптоэлектронных систем с применением МРП-фотоприемников и синтезе передаточных характеристик оптоэлектронных ключевых элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко А. Б., Плотников А. Ф., Шубин В. Э. О возможности создания импульсно-лавинного фотоприемника с устойчивым внутренним усилением на основе МДП-структуры // Квантовая электроника.— 1978.— 5, № 9.
2. Пилипович В. А., Осинский В. И., Куликов А. Ю. и др. О темновых генерационных токах, инициирующих лавинный процесс в МДП-структурах // Докл. АН БССР.— 1986.— 30, № 3.
3. Богданов С. В., Кравченко А. Б., Плотников А. Ф., Шубин В. Э. Динамика лавинного процесса в МДП-структуре при нестационарном инициирующем токе.— М., 1987.— (Препр./ФИАН; 253).
4. Bogdanov S. V., Kravchenko A. B., Plotnikov A. F., Shubin V. E. Model of the avalanche multiplication in MIS structures // Phys. Stat. Sol.— 1986.— 93(a), N 1.
5. Гассанов А. Г., Головин В. М., Егоров Ю. М. и др. Кинетика лавинного умножения носителей заряда в структурах типа металл — резистивный слой — полупроводник // Письма в ЖТФ.— 1988.— 14, № 8.

Поступила в редакцию 9 января 1989 г.

УДК 621.37 : 535.42 : 534.8

А. С. ЗАДОРИН, Л. Я. СЕРЕБРЕННИКОВ, С. Н. ШАРАНГОВИЧ

(Томск)

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ УПРУГИХ ВОЛН В ПАРАТЕЛЛУРИТЕ

Среди различных методов возбуждения упругих волн при физических исследованиях в твердых телах и создании акустоэлектронных и акустооптических устройств наиболее простым, технологичным и широкополосным является возбуждение звука с поверхности пьезокристалла нерезонансной электродной структурой — поверхностным пьезопреобразо-