

Д. ф.-м. н. И. М. ВИКУЛИН, д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШЕВ,  
Р. Г. СИДОРЕЦ, Ю. Г. ТУМАНОВ

Украина, Одесская нац. академия связи им. А. С. Попова,  
Одесский нац. университет им. И. И. Мечникова  
E-mail: ndl\_lepikh@gomail.com.ua

Дата поступления в редакцию  
04.04 2003 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. Н. ЗОЛОТКО  
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

## УСИЛЕНИЕ ТОКА В ИНЖЕКЦИОННЫХ ФОТОДИОДАХ С ПОЛЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

*Совместное действие нескольких механизмов внутреннего усиления фототока в  $p-n$ -переходе увеличивает чувствительность инжекционного фотодиода.*

Инжекционное усиление фототока в  $p-n$ -переходах с длиной базы  $d$  порядка длины диффузии неосновных носителей заряда  $L$  используется в фотоприемниках, чувствительных к слабым световым сигналам [1, с. 9]. Различают физический механизм усиления за счет положительной обратной связи и т. н. "параметрическое" инжекционное усиление [2]. Первый механизм заключается в том, что при освещении базы прямосмещенного  $p-n$ -перехода падение напряжения  $V_0$  на ней уменьшается (из-за уменьшения сопротивления), а напряжение на собственно  $p-n$ -переходе  $V_{p-n}$  увеличивается (напряжение внешнего источника питания постоянно:  $V_0 = V_{p-n} + V_0$ ). Это приводит к увеличению инжекции носителей заряда из  $p-n$ -перехода в базу и добавочному росту тока.

Сопротивление базы может уменьшаться намного сильнее, чем сопротивление  $p-n$ -перехода, за счет действия какого-либо дополнительного механизма, например, изменения параметров носителей заряда: рост времени жизни носителей, увеличение биполярной дрейфовой подвижности и биполярного коэффициента диффузии при перезарядке глубоких центров в базе диода и др. Эти эффекты и обеспечивают "параметрическое" инжекционное усиление фототока [2].

В настоящей работе в качестве механизма, усиливающего фоточувствительность длинного диода, рассмотрен полевой эффект в МДП-структуре, созданной на боковой поверхности базы. На схеме **рис. 1, а** электрод МДП-элемента отключен, вольт-амперная характеристика (ВАХ) представляет собой обычную зависимость тока  $I$  от напряжения  $V$  для  $p-n$ -перехода с длинной базой (**рис. 2**, кривая 1).

На схеме **рис. 1, б** полевой электрод соединен с омическим контактом базы, отрицательный потенциал внутреннего падения напряжения в базе  $V_{вн}$  передается на полевой электрод. В базе напротив полевого электрода образуется обедненная носителями заряда область (заштрихована). Ток протекает по оставшемуся между этой областью и противоположной поверхностью базы каналу. Сопротивление кана-

ла велико, инжекции носителей из  $p-n$ -перехода практически нет, и структура аналогична МДП-транзистору, затвор которого замкнут с истоком. В такой схеме ток  $I_n$  с ростом напряжения (уже при малых  $V$ ) достигает насыщения (**рис. 2**, кр. 2). Величина этого тока равна [3, с. 126]

$$I = 0,5 q^2 \mu n^2 a^2 b^2 / C. \quad (1)$$

Здесь  $q$  — заряд электрона;  
 $\mu$  и  $n$  — подвижность и концентрация носителей заряда в базе, соответственно;  
 $a$  и  $b$  — ширина и толщина базы, соответственно;  
 $C$  — емкость затвора.

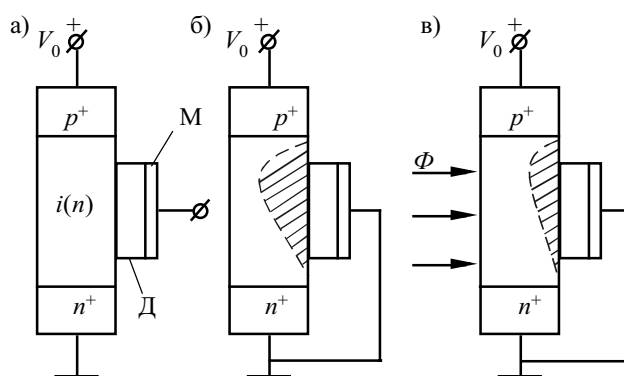


Рис. 1. Схемы включения фотоприемника:  
М — металл; Д — диэлектрик

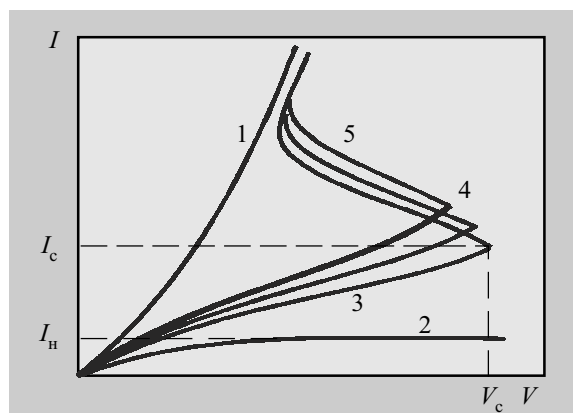


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики инжекционного фотодиода:

1 — МДП-контакт отключен; 2 — МДП-контакт подключен; 3, 4, 5 — ВАХ при освещении потоками  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ , соответственно ( $\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$ );  $V_c$  — напряжение "срыва";  $I_n$  — ток насыщения;  $I_c$  — ток "срыва"

При освещении базы потоком света  $\Phi$  (рис. 1, в) концентрация носителей заряда в ней возрастает на величину  $n_\phi$ . При этом сопротивление базы  $r_\phi$  и напряжение  $V_\phi = Ir_\phi$  уменьшаются как за счет роста концентрации носителей заряда, так и за счет уменьшения ширины области объемного заряда и расширения канала тока. Соответственно напряжение  $V_{p-n} = V_p - Ir_\phi$  растет, что приводит к дальнейшему увеличению концентрации инжектированных носителей заряда  $n_i$ , последующему уменьшению  $V_\phi$  и т. д. Такая сильная внутренняя положительная обратная связь по току приводит к резкому увеличению тока через фотодиод. В результате ВАХ принимает вид кривой 3 на рис. 2. Она относится к ВАХ структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением S-типа.

Величину тока  $I_n$  можно рассчитать по формуле (1), подставив в нее  $n = n_n + n_\phi + n_i$ , где  $n_n$  — концентрация собственных равновесных носителей заряда в базе. При этом используются известные [4, с. 19] соотношения  $n_\phi = \alpha \beta \tau \Phi$  (здесь  $\alpha$  — коэффициент поглощения света,  $\beta$  — квантовая эффективность фотоответа,  $\tau$  — время жизни носителей заряда);  $n_i = p_n \exp(qV_{p-n}/kT)$ , где  $p_n$  — концентрация неосновных носителей в базе. Проводимость базы  $\sigma = \sigma_0 [1 + (I/I_0)^\chi]$ . Постоянные  $\sigma_0$ ,  $I_0$  и  $\chi$  определяются электрофизическими параметрами материала базы.

Подставив эти соотношения в (1), можно при  $I \gg I_0$  определить напряжение:

$$V = \frac{B}{I^{\chi-1}} + \frac{kT}{q} \ln \frac{1}{p_n} \left( \frac{\sqrt{I}}{A} - n_n - \alpha \beta \tau \right) \quad (2)$$

где  $A^2 = q^2 \mu (ab)^2 / 2C$ ,  $B = \sigma_0 I_0^\chi$ .

Выражение (2) получено со множеством приближений и позволяет лишь качественно оценить вид ВАХ и их изменение при освещении  $p-n$  структуры. При наличии сильной положительной обратной связи по току  $\chi > 1$ . Поэтому с ростом тока первое слагаемое в (2) уменьшается, что приводит при достижении определенного напряжения  $V = V_c$  к уменьшению  $V$  с ростом тока, т. е. к появлению на ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 2, кр. 3).

Кривые 3, 4 и 5 на рис. 2 — рассчитанные по формуле (2) ВАХ фотоприемника для различных потоков света. У данной структуры, как и у фототиристора, с ростом светового потока напряжение переключения  $V_c$  уменьшается, т. е. такой прибор можно использовать в качестве переключателя, управляемого светом. Ток "срыва"  $I_c$  с ростом  $V$  уменьшается.

Чувствительностью инжекционного фотодиода (ИФД) с МДП-структурой можно управлять напряжением на полевом электроде. Так, если в цепь между нижним контактом к базе и полевым электродом включить дополнительный источник э.д.с.  $\epsilon$  (плюс на базе и минус на электроде, рис. 1, б), то она (э.д.с.) будет суммироваться с напряжением  $V_\phi$ . При изменении  $\epsilon$  будет изменяться ширина области объемного заряда напротив электрода и площадь поперечного сечения токопроводящего канала, а значит, и фоточувствительность структуры. При отключенном полевом электроде фоточувствительность минимальна, а

при напряжении, соответствующем полному перекрытию канала, область объемного заряда максимальна.

Как уже указывалось, ИФД могут работать не только в дискретном, но и в аналоговом режиме. В этом случае внешнее напряжение не должно превышать напряжения "срыва" (переход на участок отрицательного дифференциального сопротивления — ОДС). Необходимо также обеспечить реализацию "параметрического" инжекционного усиления.

Инжекционные фотоприемники с МДП-элементом исследованы нами на основе кремния  $n$ -типа проводимости, компенсированного золотом. Помимо Au, материал базы диода содержал донорную примесь с малой энергией ионизации (фосфор). Концентрация электрически активных центров золота составляла  $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Ранее было показано, что в  $n\text{-Si:Au}$  может быть реализовано фотоэлектрическое инжекционное усиление при действии ИК-света [5].

В нашем случае  $pin$ -структуры изготавливали вплавлением Al ( $p^+$ -контакт). Омический  $n^+$ -контакт получали напылением сплава Au—Sb (10% Sb) и вжиганием его при  $T=400^\circ\text{C}$ . На боковой поверхности базы формировали Al—SiO<sub>2</sub>—Si МДП полевой электрод. Длина базы инжекционного  $pin$ -фотодиода составляла 0,2—0,5 мм, сечение базы 2×2 мм. Для исследования эквивалентных резисторов, т. е. структур, имеющих те же геометрические размеры, что и база ИФД, рядом с  $p^+$ -контактом изготавливали второй —  $n^+$ -контакт. Измерения проводили при  $T=78 \text{ K}$ .

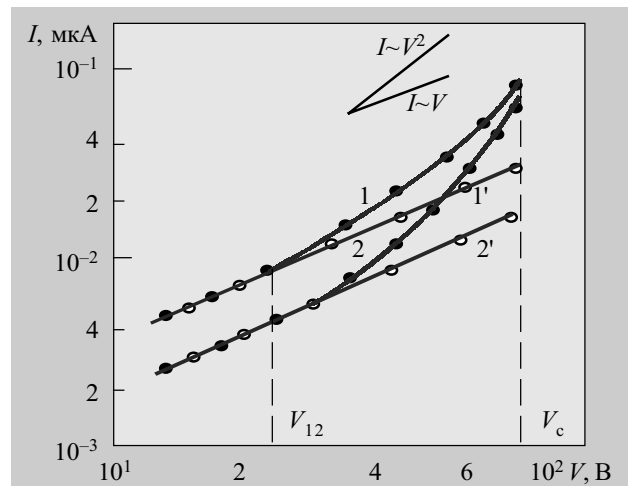


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структуры при  $V < V_c$  и эквивалентного резистора ( $I$ , 2 и  $I'$ , 2', соответственно):  $I$ ,  $I'$  — МДП-контакт отключен; 2, 2' — МДП-контакт подключен

На рис. 3 приведены ВАХ  $pin$ -структуры с МДП полевым электродом. ВАХ при отключенном контакте МДП элемента (кр. 1) представляет собой типичную характеристику длинного диода. Она состоит из двух частей: омической ("линейной"), описываемой известным соотношением

$$I = q(\mu_n n_0 + \mu_p p_0) \frac{V}{d}, \quad (3)$$

и степенной ("квадратичной") —

$$I = \frac{q}{8} n_0 - \gamma p_0 |\mu_n \mu_p| \frac{V^n}{d}. \quad (4)$$

Здесь  $n_0$  и  $p_0$  — равновесные концентрации электронов и дырок в базе, соответственно;

$\mu_n$  и  $\mu_p$  — подвижность электронов и дырок;  
 $\gamma = \tau_n / \tau_p$  — отношение времен жизни электронов и дырок;  
 $V$  — приложенное напряжение;  
 $d$  — длина базы диода;  
 $n=2$  — показатель степени при  $V$ .

Линии  $I \sim V^2$  и  $I \sim V$  — наклоны "квадратичного" и "линейного" участков ВАХ. При приближении к точке "срыва" зависимость  $I$  от  $V$  более резкая, чем  $I \sim V^2$ . Кривая 1' — ВАХ эквивалентного резистора.

Напряжение перехода с "линейного" на "квадратичный" участок  $V_{12}$  определяли экспериментально, а также рассчитывали по известному соотношению [1, с. 10], полученному приравниванием (3) и (4).

$$V_{12} \approx d^2 / \mu_p \tau_p. \quad (5)$$

Для кривой 1 на рис. 3 напряжения, соответствующие экспериментальному значению и рассчитанной величине  $V_{12}$ , достаточно удовлетворительно совпадают. Кривая 2 описывает ВАХ структуры при подключенном контакте МДП-электрода (см. рис. 1, б). Величина тока через инжекционный диод уменьшилась вследствие сокращения сечения канала протекания тока, но основные составляющие (омический и степенной участки) сохранились. Кривая 2' представляет собой ВАХ эквивалентного резистора. Отсутствие насыщения тока (см. рис. 2, кр. 2) свидетельствует о том, что перекрытие канала протекания тока вследствие эффекта поля произошло лишь частично. Напряжение  $V_{12}$  на кр. 2 рис. 3 несколько большее, чем на кр. 1, несмотря на то, что расчет  $V_{12}$  даже для разных сечений канала дает приблизительно одну и ту же величину. Такое расхождение может быть связано с большим вкладом поверхностной рекомбинации носителей заряда (через снижение  $\tau_p$  и  $\tau_n$ ) в величину тока при уменьшении эффективного сечения канала проводимости при действии полевого эффекта.

Вариантами "параметрического" фотоэлектрического инжекционного усиления при освещении структур могут быть увеличение биполярной дрейфовой подвижности и времени жизни носителей заряда в случае перезарядки глубоких уровней золота при действии "примесного" ИК-света [2].

Действие механизма усиления вследствие вклада полевого эффекта МДП-электрода и "параметрического" инжекционного усиления при освещении ИФД "примесным" светом проявляется на зависимости токовой фоточувствительности  $S_I$  от напряжения при разных вариантах подключения *pin*-структуры. Кривые 1 и 1' на рис. 4 — зависимости  $S_I = f(V)$  для ИФД и эквивалентного резистора, соответственно, при освещении диода с отключенным МДП-электродом светом с  $h\nu \approx 0,82$  эВ. Напряжение  $V_{12}$  в данном случае описывается соотношением [1, с. 12]

$$V_{12} = \frac{n_\phi d^2}{\gamma p_\phi \mu_p \tau_p}, \quad (6)$$

где  $n_\phi$  и  $p_\phi$  — концентрации электронов и дырок, генерированных светом.

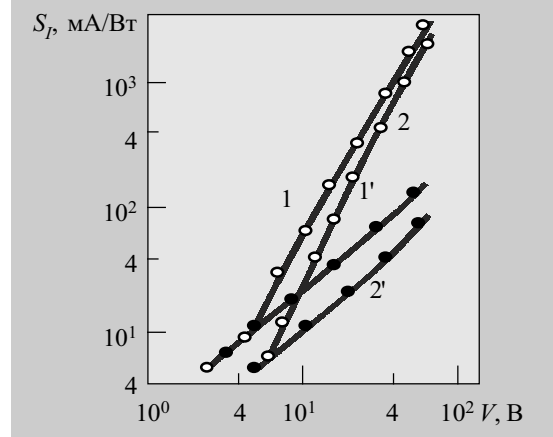


Рис. 4. Зависимость токовой фоточувствительности ИФД (1, 2) и эквивалентного фоторезистора (1', 2') от напряжения:

1, 1' — МДП-контакт отключен; 2, 2' — МДП-контакт подключен. Энергия кванта света  $h\nu = 0,83$  эВ

При подключенном МДП-электроде (см. рис. 1, в и рис. 2, кр. 3) для напряжений  $V$ , меньших напряжения срыва, зависимости  $S_I = f(V)$  для ИФД и эквивалентного резистора соответствуют кривым 2 и 2' рис. 4. Действие двойного механизма модуляции проводимости базы, т. е. инжекционного усиления, проявляется в более резкой зависимости  $S_I$  от  $V$ , чем для случая отключенного МДП-электрода (рис. 4, кр. 1). Токовая чувствительность эквивалентного резистора (кр. 2') также не следует линейному закону, т. к. с ростом напряжения сечение канала проводимости базы увеличивается.

Были определены  $A_1$  и  $A_2$  — величины коэффициентов инжекционного усиления для каждой пары кривых на рис. 4 (1 и 1', 2 и 2', соответственно). Величина  $A$  определялась как отношение токовой чувствительности ИФД к чувствительности эквивалентного фоторезистора при фиксированном напряжении  $V$ .

На рис. 5 показана зависимость относительной величины инжекционного усиления  $K = A_2 / A_1$  от напряжения смещения.

Известно, что генерационно-рекомбинационные (ГР) шумы определяют принципиальный предел обнаружительной (детектирующей) способности  $D^*$  объемных фотоприемников. Для структур, предназначенных для регистрации слабых сигналов, важным

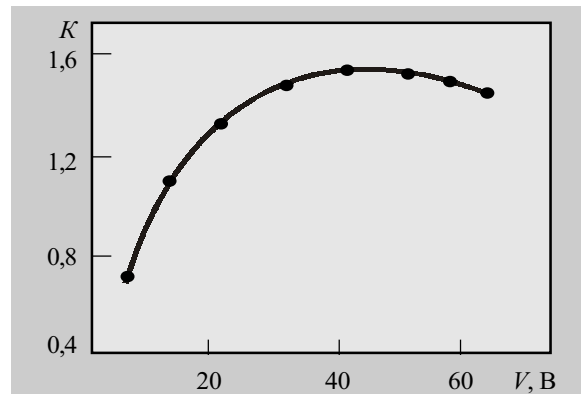


Рис. 5. Зависимость относительной величины коэффициента инжекционного усиления от напряжения

параметром является пороговая чувствительность  $\Phi_{\text{пор}}$ . Она определяется той мощностью излучения, при которой величина сигнала (ток, напряжение) и шума равны:

$$\Phi_{\text{пор}} = \frac{\sqrt{I_{\text{ш}}^2}}{S_I \sqrt{\Delta f}} \quad (7)$$

Здесь  $\sqrt{I_{\text{ш}}^2}$  — среднееквадратичное значение тока шума  $I_{\text{ш}}$ ;  $\Delta f$  — частотная полоса пропускания.

Величина  $D^* = \sqrt{A_{\text{ф}}} / \Phi_{\text{пор}}$  и является обнаружительной способностью фотоприемника ( $A_{\text{ф}}$  — площадь приемной площадки).

В работе [6] показано, что в ИФД могут существовать несколько типов ГР-шумов с различной зависимостью от напряжения. Соответственно и величина  $D^*$  также является функцией напряжения. Для исследованных в данной работе фотодиодов можно выделить три участка  $I_{\text{ш}} = f(V)$ . При относительно низких напряжениях ( $V < 8 \div 10$  В)  $I_{\text{ш}} \sim V^{3/2}$ , и  $D^* \sim V^{1/2}$ . При  $V > 10$  В  $I_{\text{ш}} \sim V^2$ ,  $D^* = \text{const}$ . Напряжениям  $V > 40 \div 50$  В соответствует резкий рост шумового тока ( $I_{\text{ш}} \sim V^{5/2}$ ), и  $D^* \sim V^{-1/2}$ .

Спектры шумового тока при напряжениях на ИФД, отвечающих первым двум участкам  $I_{\text{ш}} = f(V)$ , хорошо аппроксимируются зависимостью  $(1 + \omega^2 \tau^2)^{-1/2}$ , (где  $\omega$  — циклическая частота,  $\tau$  — постоянная времени), т. е. соответствуют ГР-шумам. Слагаемые шумового тока можно интерпретировать, используя представление о фотоэлектрическом усилении [1]. Так, рекомбинационный шум  $I_{\text{ш}} \sim V^{3/2}$  определяется фоторезистивно усиленными флуктуациями захвата неосновных носителей заряда глубокими уровнями (Au) в базе. Компонента шума  $I_{\text{ш}} \sim V^2$  связана с инжекционным усилением равновесных флуктуаций генерации и захвата (рекомбинации) возбужденных светом носителей. Ток  $I_{\text{ш}} \sim V^{5/2}$  соответствует инжекционно усиленным флуктуациям захвата инжектированных носителей.

На рис. 6 показана зависимость обнаружительной способности  $D^*$  ИФД от величины приложенного напряжения  $V$ . Видно, что область максимального значения величины  $D^*$  приходится на тот диапазон напряжений, где коэффициент усиления ИФД с поле-

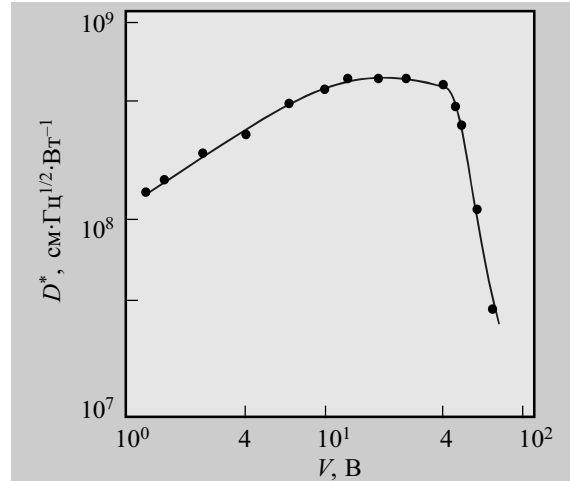


Рис. 6. Зависимость обнаружительной способности ИФД от напряжения ( $\lambda=0,8$  мкм)

вым МДП-электродом на боковой поверхности базы наибольший (см. рис. 5).

\*\*\*

Наличие полевого МДП-электрода на боковой поверхности базы ИФД позволяет увеличить коэффициент усиления структуры в области средних напряжений (20 ÷ 50 В). Это дает возможность регистрировать слабые световые сигналы, т. к. шумы при таких напряжениях незначительны и детектирующая способность фотоприемника наибольшая.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники с инжекционным усилением.— М.: ЦНИИ "Электроника", 1989.
2. Kurmashev Sh., Stafeev V., Vikulin I., Sofronkov A. Injektion-amplification IR-photodiodes // Proc. SPIE. — 1997. — Vol. 3182. — P. 59—67.
3. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1990.
4. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Курмашев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприемники.— М.: Радио и связь, 1984.
5. Курмашев Ш. Д., Викулин И. М., Ленков С. В., Сидорев Р. Г. Спектральная фоточувствительность Ni—Si: Au поверхностно-барьерных структур с инжекционным усилением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 6.— С. 16—19.
6. Курмашев Ш. Д., Викулин И. М., Софронков А. Н. Обнаружительная способность инжекционных фотодиодов вблизи точки "срыва" на ВАХ // Мат-лы 4-й междунар. конф. "Системы и средства передачи и обработки информации".— Одесса.— 2000.— С. 47—48.

В номере 2 журнала за 2003 год на стр. 46 на рис. 1 допущена опечатка.

Должно быть:

