УДК 621.315.592

Зингаева Е. И.; Зуев В. А., д.ф.-м.н.; **Горыня Л. М.,** к.ф.-м.н.
(Государственный университет телекоммуникаций. +380 67 409 86 97. lenazig@rambler.ru)

КРЕМНИЕВЫЙ МДП-ФОТОТРАНЗИСТОР ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Зінгаєва О. І., Зуєв В. О., Гориня Л. М. Кремнієвий МДН-фототранзистор для оптичного зв'язку. Запропонований модернізований кремнієвий МДН-фототранзистор з використанням поверхневої інфрачервоної фотопровідності, його розрахунок і конструкція в оптичному зв'язку. МДН-фототранзистор є МДН-транзистором з напівпрозорим затворним електродом, через який робиться освітлення підзатворної області напівпровідника. Досліджені основні характеристики в режимі роботи накопичення заряду фототранзистора. Запропонований пристрій дозволяє здійснити прийом оптичної інформації в умовах малих світлових потоків видимого та ультрафіолетового діапазонів. Перевага представленої методики полягає в підвищенні фоточутливості приладів. Динамічний діапазон приладу істотно розширений в порівнянні із стаціонарним режимом. Визначені параметри фототранзистора і технічні характеристики фотоприймальних пристроїв.

Ключові слова: фотодіод, оптичний зв'язок, фототранзистор, МДН, метал-діелектрик-напівпровідник, дифосфід кадмія, фотогенерація

Зингаева Е. И., Зуев В. А., Горыня Л. М. Кремниевый МДП-фототранзистор для оптической связи. Предложен модернизированный кремниевый МДП-фототранзистор с использованием поверхностной инфракрасной фотопроводимости, его расчет и конструкция в оптической связи. МДП-фототранзистор представляет собой МДП-транзистор с полупрозрачным затворным электродом, через который производится освещение подзатворной области полупроводника. Исследованы основные характеристики в режиме работы накопления заряда фототранзистора. Предлагаемое устройство позволяет осуществить прием оптической информации в условиях малых световых потоков видимого и ультрафиолетового диапазонов. Преимущество представленной методики состоит в повышении фоточувствительности приборов. Динамический диапазон прибора существенно расширен по сравнению со стационарным режимом. Определены параметры фототранзистора и технические характеристики фотоприемных устройств.

Ключевые слова: фотодиод, оптическая связь, фототранзистор, МДП, металл-диэлектрик-полупроводник, дифосфид кадмия, фотогенерация

Zingayeva E. I., Zuyev V. O., Horynya L. M. Silicon MIS-phototransistor for optical communication. The modernized MIS (metal-insulator-semiconductor) phototransistor is made with usage of superficial infra-red photoconductivity, done its estimation and design for optical communication. MIS phototransistor is a MIS - transistor with a semi-lucent gate electrode, through that illumination of semiconductor's sub-gate area is produced. The basic characteristics of the photo-transistor's charge accumulation mode are investigated. The offered device is provided the reception of optical information in case of low light streams conditions of visible and ultraviolet areas. Advantage of the presented methodology consists of increase equipment photo-sensitivity. The dynamic range of the equipment is substantially extended in comparison with the static mode. The parameters of photo-transistor and technical characteristics of photo-recievers are defined.

Key words: photo-diode, optic communication, photo-conductivity, MIS, metal-insulator-semiconductor, cadmium diphoshide, photo-generation

Введение. В работе [1] впервые исследован фототранзистор со структурой МДП (металл-диэлектрик-полупроводник). В качестве полупроводника использован кремний. Цель данной работы – модернизовать расчет и конструкцию указанного устройства применительно к использованию в оптической связи. Как известно, в настоящее время эта связь осуществляется в ближней инфракрасной области (длина волны λ, как правило, составляет 1,55 мкм). Поэтому разработка модернизированного фототранзистора была направлена на использование поверхностной инфракрасной фотопроводимости и на повышение фоточувствительности прибора.

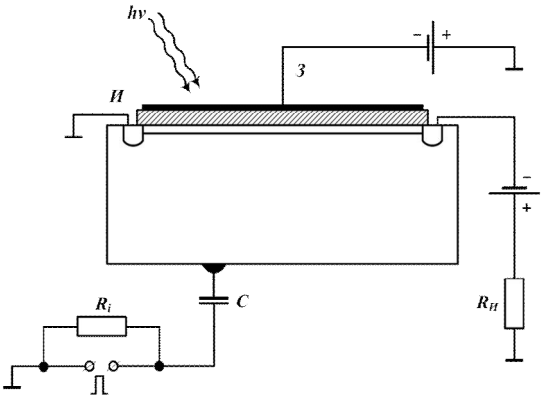

Рис. 1. Схема включения МДП-фото-транзистора в режиме накопления заряда

На Рис. 1 изображена схема включения прибора в режиме накопления заряда [2]. В качестве затворного электрода (з) использовался

полупрозрачный слой никеля.

Электрод подложки прибора используется в качестве второго затвора для управления режимом накопления по световому сигналу (Рис. 1). Одновременно может осуществляться управление током стока транзистора с помощью сигнала, подаваемого на электрод затвора. Напряжение исток-подложка V_{un} определяется напряжением на конденсаторе C, заряжаемом до максимального значения V_u от генератора импульсов через p-n-переход исток-подложка, смещенный в прямом на правлении. Полярность импульсов определяется типом проводимости подложки.

МДП-фототранзистор представляет собой МДП-транзистор с полупрозрачным затворным электродом, через который производится освещение подзатворной области полупроводника. При этом меняется пороговое напряжение формирования инверсионного канала и крутизна проходной характеристики. В смешанном режиме осуществляется фотогенерация носителей как в фотодиоде истока, так и в области пространственного заряда (ОПЗ) и подзатворной области [5].

Если напряжение на затворе транзистора в темноте меньше порогового, освещение приводит к накоплению неосновных носителей в приповерхностной области полупроводника при разделении пар неравновесных носителей заряда полем ОПЗ, а также к захвату основных неравновесных носителей ловушками границы раздела ДП. Оба эти процесса способствуют ускорению образования инверсионного канала и возникновению проводимости между истоком и стоком МДП-фототранзистора освещение приводит к увеличению концентрации подвижных носителей в канале.

Для определенности рассмотрим МДП-фототранзистор с p-каналом. Рассмотрим случай однородного невырожденного полупроводника и преобладания дрейфового тока в канале над диффузионным. Ток стока МДП-фототранзистора равен сумме токов канала $I_к$ и тока обратно-смещенного перехода сток-подложка. $I_{сп}$. При освещении структуры значение этого тока увеличивается на ξI, где ξ – фоточувствительность обратно смещенного перехода сток – подложка. Ток в канале

$$I_к = \varpi e \mu_p \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}x} \int_0^{d_к} p(y)\mathrm{d}y ,$$

где $\int_0^{d_к} p(y)\mathrm{d}y$ – подвижный заряд на единицу площади канала, который можно определить из уравнения электрический нейтральности структуры; $d_к$ – глубина канала; ϖ – ширина канала.

Уравнение электронейтральности имеет следующий вид:

$$Q_З+Q_д+Q_{дп}+Q_п=C_д[V_З - \varphi_{мп} - (kT/e)y_s]+Q_д+Q_{дп}+Q_п=0,$$

где $Q_З$, $V_З$ – заряд и напряжение на затворе соответственно; $Q_{дп}$ – заряд в диэлектрике; $Q_{дп}$ – заряд электронных состояний границы раздела ДП; $C_д$ – удельная емкость диэлектрика; $\varphi_{мп}$ – контактная разность потенциалов металл-полупроводник; y_s – изгиб зон на границе раздела ДП; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона.

При малых уровнях инъекции неосновных неравновесных носителей и слабой зависимости подвижности от концентрации носителей в канале выражения для коэффициента фоточувствительности МДП-фототранзистора упрощается:

$$K_I=(P_I - P)P,$$

где P_I и P – полная и равновесная концентрации носителей в канале, рассчитанные в [2]:

$$P_I = 2n_\upsilon L_{\acute{y}} \left\{ \left[\left(e^{-2u_b} + \Delta p \right) \left(e^{-y_{sI}} - 1 \right) - y_{sI} \right]^{1/2} - \left(-y_{sI} \right)^{1/2} \right\},$$

$$P = 2n_\upsilon L_э \left\{ \left[e^{-2u_b} \left(e^{-y_{sI}} - 1 \right) - y_{sI} \right]^{1/2} - \left(-y_{sI} \right)^{1/2} \right\}. \quad \textbf{(1)}$$

В области инверсионных изгибов зон условие общей нейтральности для МДП-фототранзистора имеет вид

$$C_{\xi}\left(V_{э}-\frac{kT}{e}y_{sI}-\phi_{МП}\right)+2n_{\upsilon}eL_{э}\left[\left(e^{-2u_b}+\Delta_p\right)\times\left(e^{-y_{sI}}-y_{sI}-1\right)\right]^{1/2}+\left(N_{t1}-n_{t1I}\right)-en_{t2I}=0,$$

где N_{t1} – концентрация поверхностных уровней донорного типа; n_{t1I}, n_{t2I} – концентрации электронов на поверхностных уровнях донорного и акцепторного типов.

Индекс «*I*» указывает освещение прибора. Величины n_{t1I}, n_{t2I} связаны с параметрами поверхностных электронных состояний (сечения захвата электронов и дырок, концентрация ПЭС) соотношениями, подчиняющимся статистике Шокли-Рида и рассчитанными в [2]. Кроме того, следует учитывать изменения приповерхностного изгиба зон при освещении.

В отсутствие освещения (Δ_p=0)

$$n_{t1,2}= N_{t1,2}/[1+\exp(E_{1,2}-y_s-u_b)],$$

где $E_{1,2}$ энергетическое положение уровня, отсчитанное от середины запрещенной зоны.

Уравнение (1) решалось на ЭВМ с применением модели системы трех дискретных поверхностных центров с параметрами, типичными для структур Si-SiO$_2$. Полученные результаты представлены на Рис. 2. Из расчета следует, что при истощающих и инверсионных изгибах зон рабочим является уровень донорного типа, обеспечивающий захват основных носителей заряда. С увеличением Δ_p K_I растет, причем наибольшая чувствительность к поверхностному прилипанию наблюдается при слабо открытом канале. Поверхностные прилипание основных носителей увеличивает фоточувствительность прибора, поскольку приводит к уменьшению порогового напряжения транзистора при освещении.

На Рис. 3 изображено спектральная зависимость фототока. Наибольший интерес (с точки зрения оптической связи) представляет инфракрасные (ИК) области.

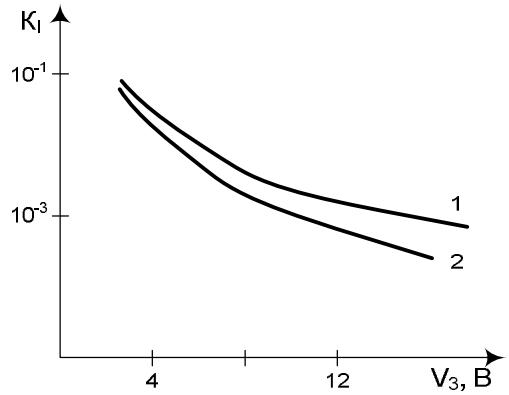

Рис. 2. Зависимость коэффициента фоточувствительности от напряжения на затворе: 1 – расчет; 2 – эксперимент

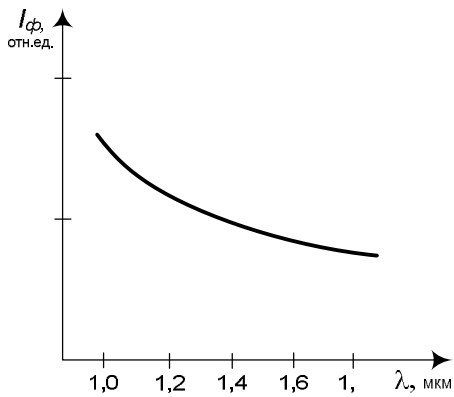

Рис. 3. Спектральная зависимость фототока

Поверхностная ИК фотопроводимость наблюдалась ранее в Si и Ge при достижении относительно высоких плотности поверхностных электронных состояний (ПЭС) N_t. Чувствительность в ИК области существенно возрастала при реализации поверхностного истощения, поскольку при этом исключаем захват неравновесных носителей "гасящими" ловушками.

Аналогичный механизм, по-видимому, автоматически реализуется в фото транзисторе, где вклад в фототок дает лишь область инверсии (канала), благодаря чему МДП-транзистор оказывается чувствительным к ИК излучению. При этом реализуется монополярный

кинетический режим измерения $I_ф$. Он обусловлен преимущественным обменом электронов валентной зоны с незаполненными ПЭС, поэтому

$$I_ф \approx e\mu_p \gamma I N_{t^{\tau_u}},$$

где τ_u – длительность светового импульса; γ – сечения фотоионизации ПЭС.

Кинетический режим проявляется в сдвиге фазы сигнала фото ответа относительно фазы модулированного светового пучка на переходе в ИК область. Остановимся на некоторых конструктивных особенностях фототранзистора.

Уровень легирования подложки влияет на коэффициент усиления транзистора. Сильнолегированная подложка электростатически экранирует сток от канала, повышая коэффициент усиления. Оптимальным является использования материала с удельным сопротивлениям 20…25 Ом·см. Дальнейшее уменьшение удельного сопротивления подложки приводит к падению фотосигнала из-за уменьшения уровня инъекции неравновесных носителей. В то же время применение низкоомных подложек (уровень легирования ~10^{17} см$^{-3}$) позволяет осуществлять дополнительное управление током канала путем подачи смешения исток-подложка [7].. Использования такого режима дает возможность реализовать один из вариантов работы фототранзистора в режиме накопления заряда, Рис. 1. Толщина диэлектрика (SiO_2) составила 100 нм. Окисления производилось, в сухом кислороде для уменьшения влияния поверхностного захвата, который затрудняет получение приборов с воспроизводимыми характеристиками [9, 10].

Приведем технические характеристики фотоприёмного устройства.

Динамический диапазон (при скорости передачи оптической информации $40\ \frac{\text{мбит}}{\text{с}}$) составил 25 дБ. Чувствительность прибора равнялась –40 дБм.

Литература

1. Исследование кремниевых МДП-фототранзисторов / [В. А. Зуев, В. Г. Попов, А. В. Саденко и др.] // Український фізичний журнал/ – 1977. – Т.22, №2. – С. 324-330.

2. Зуев В. А. Фотоэлектрические МДП-приборы / В. А. Зуев, В. Г. Попов. – М.: Радио и связь, 1983. – 160 с.

3. Чуйко Г. П. Специфика электронных спектров пространственно-модулированных фаз кристаллов класса 422 / Г. П. Чуйко // Український фізичний журнал. – 1989. – Т.34, №2. – С. 271-276.

4. Зуев В. А. Лавинный фотодиод на основе CdP2 / В. А Зуев, Л. М Горыня // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2011. – Т.9, №1. – С. 106-109.

5. Скубак О. М. Деякі питання визначення конструктивних параметрів оптичних кабелів зі стрічковим осердям / О. М. Скубак, О. О. Манько // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2011. – Т.9, №4. – С.364 – 372.

6. Кравченко А. Б. О возможности создания импульсного лавинного фотоприемника с устойчивым внутренним усилением на основе МДП-структуры / А. Б. Кравченко, А. Ф. Плотников, В. З. Шубин // Квантовая электроника. – 1978. – Т.5, №9. – С.1918-1923.

7. Скубак О. М. Особливості та вплив поляризаційної модової дисперсії на розповсюдження сигналів в оптичних світловодах / О. М. Скубак, О. О. Манько // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – №1(17). – С.35-41.

8. Shepard F. D., Yang A. C., Tailor R. M. A 1 to 2 μm silicon avalanche Photodiode // Pro. JEEF, vol. 58, no. 8, pp. 1160-1162, 1970.

9. Тришенков М. А. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с *p-n* переходами / М. А. Тришенков, А. И. Фример ; под ред. Я. А. Фляпова. – Москва : Сов. радио, 1971. – 203 с.

10. Шевцов Э. А. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи / Э. А. Шевцов, М. Е. Белкин. – Москва : Радио и связь, 1992. – 224 с.