УДК 621.315.592

Е.И. Зингаева, В.А. Зуев

Государственный университет телекоммуникаций, Киев

КРЕМНИЕВЫЙ МДП (МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК) – ФОТОТРАНЗИСТОР ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Теоретически и практически кремниевый МДП–фототранзистор применяют для инфракрасной области. Фоторезистор может быть использован в оптических линиях связи.

Ключевые слова: *фотодиод, оптическая связь, дифосфид кадмия.*

Введение

В настоящее время в оптической связи (ОС) в качестве фотоприемников наиболее широко используются фотодиоды (см., [1]). Однако, все более пристальное внимание уделяется использованию фототранзистор в ОС поскольку по ряду параметров они превосходят фотодиоды.

В [2] был исследован кремневый МДП-фототранзистор, применяемый для первого окна прозрачности (0,8 мкм). Между тем для ОС наиболее актуально использование фотоприемников в ближней инфракрасной (ИК) области спектра (например, для длины волны λ, равной 1,55 мкм). Известны [3] кремниевые МДП-фототранзисторы для этой области, основанная на легированном объеме Si применяемые Au, In или Ga. Однако, их существенным недостатком является возможность их использования при пониженных температурах (T≤100 K) это обстоятельство исключает их применение в ОС.

В настоящей работе предложен кремневый МДП-фототранзистор, применяемый для использования при комнатной температуре. Предложенное устройство функционирует в ИК области за сет поверхностных термооптических переходов.

Анализ термооптических переходов

Модель термооптических переходов изображена на рис. 1.

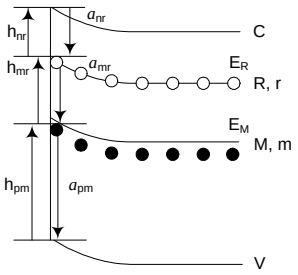

Рис. 1. Анализ термооптических переходов

Для модели, приведенной на рис. 1 анализ проведен лианеаризованным уравнением, описывающий электронным обменом верхних (r) и нижних (m) уровней с зонами и друг с другом, запишутся в виде

$$\frac{d\delta r}{dt} = \beta a_{\phi} I + h_{mr}\delta m - h_{nr}\delta r + a_{rm}\delta r \qquad (1)$$

$$\frac{d\delta m}{dt} = -\beta a_{\phi} I + h_{mr}\delta m + a_{rm}\delta r + h_{pm}\delta m - a_{mp}\delta p \quad (2)$$

где

$$h_{mr} = VC_{mr} e^{E_r - E_m} MRf_{nm} f_p r h_{nr} - VC_{nr} p_{0s} f_{nr}^{-1} \quad (3)$$

$$a_{nr} = VC_{nr} p_{pr}, \qquad a_{nr} = VC_{mr} MRf_{nr} f_{pm}; \quad (4)$$

$$h_{pm} = VC_{pm} p_{0s} f_{pm}^{-1}, \quad a_{pm} = VC_{pm} Mf_{nm} \qquad (5)$$

Здесь f_{pr} - функция заполнения уровней электродами и дырками. M, R – концентрация соответствующих уровней; a, h - коэффициенты захвата носителей при соответствующих переходах; V - тепловая скорость носителей; a_{ϕ} - сечение захвата фотона; I - интенсивность световой генерации; n_{0s}, p_{0s} - концентрация темновых электронов и дырок на поверхности; β – феноменологический квантовый выход; C – сечение захвата. Дырочные и электронные потоки носителей на поверхности записываются в виде

$$j_{ps} = h_{pm}\delta m - a_{pm}\delta p_s; \quad j_{ns} = h_{rn}\delta r - a_{nr}\delta n_s . \quad (6)$$

Выражая световые добавки электронов на уровнях δβ, δn через световые добавки свободных носителей в зонах δβ, δn, преобразуем (6) для стационарного случая к виду

$$j_{ns} = G + V_{nm}\delta n_s + V_{np}\delta p_s;\quad j_{ps} = G + V_{pn}\delta n_s + V_{pp}\delta p_s;$$
$$V_{nm} = \frac{a_{nr}h_{pm}\left(h_{pm} - h_{mr}\right)}{\Delta} - a_{nr} \qquad (7)$$

$$V_{np} = a_{pm}h_{mr}h_{nr}\Delta^{-1};\quad V_{pp} = a_{pm}h_{pm}\left(h_{rn} + a_{rm}\right)\Delta^{-1}$$
$$V_{pn} = a_{rm}a_{nr}h_{pm}\Delta^{-1} \qquad . (8)$$

$$G = h_{pm}h_{rn}\beta a_{\phi}I\Delta^{-1};\quad \Delta = h_{pm}\left(h_{rn} + a_{rm}\right) - h_{rn}h_{mr}$$

Добавочное поле на поверхности можно выразить на основе теоремы Гаусса следующим образом:

$$\left.\frac{d\delta}{dx}\right|_s = \frac{\kappa^2}{n_{0v}}\left(\delta r + \delta m\right) \qquad (9)$$

или

$$\left.\frac{d\delta y}{dx}\right|_s = \frac{\kappa^2}{n_{0s}}\left(G^1 + Z_n\delta n_s + Z_n\delta p_s\right) \qquad (10)$$

где

$$G^1 = \frac{G}{h_{pm}h_{rn}};\quad Z_n = \frac{V_{nn} + a_{rn}}{h_{rn}} + \frac{V_{pn}}{h_{pn}}$$
$$Z_p = \left(V_{pp} + a_{pm}\right)h^1_{pm} + V_{np}h^1_{rn} \qquad (11)$$

к - обратный радиус экранирования; n_{0V} - концентрация основных носителей в объеме полупроводника.

Расчет фотопроводимости канала МДП-транзистора толщиной l неосновных носителей L_p, проведем по формуле выведенной в [4]

$$\sigma = e\left(\mu_p + \mu_n\right)\int_0^l \delta p dx + e\mu_n\frac{n_{0v}}{\kappa^2}\left.\frac{d\delta y}{dx}\right|_s .$$

Используя громоздкие выражения (4), описывающие распределение дырок в канале, имеем

$$\sigma_{\phi} = e\left(\mu_p + \mu_n\right)\delta p_s L_p\left(1 + L\right) - e\mu_n\left(G + Z_n\delta n_s + Z_p\delta p_s\right), \qquad (12)$$

где $L = \frac{1}{L_p}\int_0^l e^{-y}dx$.

Константы δp_s, δn_s определяются из условия непрерывности δp, δE в точке под областью пространственного заряда на основе методики, описанной в работе [4]. В результате получим

$$\delta p_s = G\left[\left(1 - e^{-v_{n_s}}\right) - \left(\frac{V_{pn}}{L_{pn}} + Z_n\right)\left.\frac{dy_0}{dx}\right|_s\right]\Delta ,$$

$$\Delta = V_{pn}\left[\left(1 - e^{-v_{0s}}\right) - Z_p\left.\left(\frac{dy_0}{dx}\right)\right|_s\right]\times \times\left[V_{pp} + \frac{D_p y_{0s}}{L_p}\left(1 + L_p\right)\right], \qquad (13)$$

y_{0s} – изгиб зон на поверхности

$$\delta n_s = \frac{G\left(\frac{dy_0}{dx}\right)_s + \left[\left(1 - e^{y_{0s}}\right) - Z_p\left(\frac{dy_0}{dx}\right)_s\right]}{Z_n\left.\frac{dy_0}{dx}\right|_s - \left(1 - e^{y_{0s}}\right)}\delta p_s . \qquad (14)$$

Для системы $Si\text{-}SiO_2$ типичным является доминирующий обмен поверхности центров с зоной основных носителей (в данном случае С зоной), что позволяет привести выражение (12) к виду

$$\sigma_{\phi} = ep_n\frac{a_{nr}}{h_{nr}}\delta n_s ,$$

где

$$\delta n_s = I\beta a_{\phi}\frac{\left(1 - e^{-y_{0s}}\right)h_{nr}\left(1 + \delta r\right) + \delta r}{e^{-2y_{0s}}a_{rm}a_{nr} + \delta r}, \qquad (15)$$

$$\delta r = \frac{a_{nr}}{h_{nr}}e^{y_{0s}}\left(\frac{dy_0}{dx}\right)_s . \qquad (16)$$

Из опытов по эффекту поля известно, что для кремния отношение начальной и конечной амплитуд релаксации эффекта поля, равное величине δr, обычно велико (δr>>1 сильная экранировка). Далее, при условиях, типичных для истощения и инверсии кремния, в числителе выражения для δn_s, доминирует второй член. Тогда

$$\sigma_{\phi} = e\mu_n\beta I a_{\phi}\exp\left(-E_r\right)\frac{1}{f_{nm}C_{rm}MRC_{nr}} . (17)$$

В частности, при слабом заполнении центров, когда заведено f_{nm}<<1.

$$\sigma_{\phi} = Ae^{-v_{0s} + 2U_s - E_1 - E_{0s}} ,$$

где U_n - положение уровня Ферми в объеме полупроводника.

Экспериментальные результаты

Как следует из вышеизложенного, для реализации рассмотренной модели необходима граница раздела $Si\text{-}SiO_2$ с соответствующими дискретными уровнями. В настоящее время указанная граница изучена весьма досконально, в том числе с использованием данных по электронному парамагнитному резонансу. Удалось установить существование двух дискретных поверхностных уровней (выше и ниже середины защищенной зоны) с повышенной концентрацией на фоне квазинепрерывно распределительных уровней с пониженной концентрацией [5].

Нами были изучены МДП-фототранзисторы, полученные при различной технологии получения слоя SiO_2 и при различных полупрозрачных затворных электродах.

Ниже будут приведены результаты для оптимального варианта, соответствующего реализации рассмотренной выше модели. Этот вариант соответствовал получению SiO_2 при окислении Si в присутствии паров C_2HCl_3 и последующему прогреву в вакууме при 400 °С в течение 1 часа.

В качестве полупрозрачного затворного электрода использовалась пленка поликристаллического кремня.

На рис. 2 изображено спектральное распределение фототока канала. Видно, что наблюдается заметная фоточувствительность в ближней ИК-области.

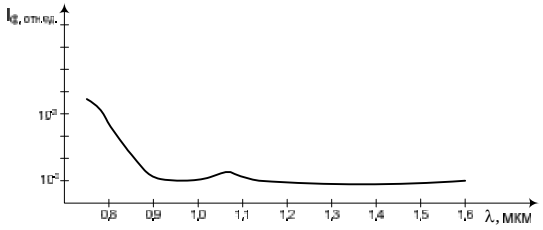

Рис. 2. Спектральное распределение фототока

На рис. 3 изображены зависимости коэффициента чувствительности ($к_I$) от напряжения на затворе $V_з$.

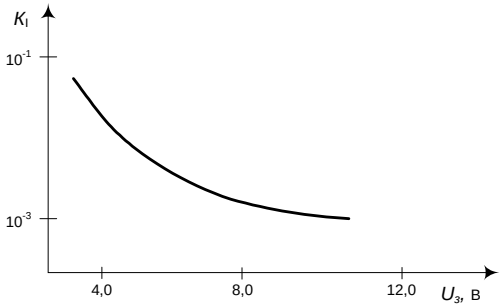

Рис. 3. Зависимость коэффициента чувствительности от напряжения на затворе

Величина *к* определяется с помощью следующего выражения

$$к_I = \frac{P_I - P}{P},$$

где P_I и P - полная (освещение) равновесие (темноты) концентрации по системе в канале, рассчитанная в [6].

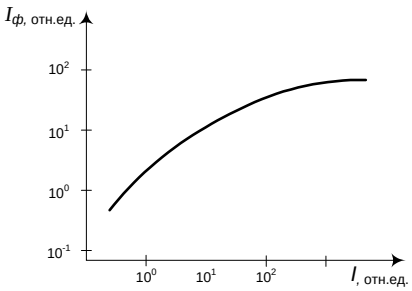

Рис. 4. Зависимость фототека МДП-фототранзистора от интенсивности освещения

Фоточувствительность предложенного прибора составляла 5 мВт/мкДж (определялась как отношение выходной мощности к входной энергии излучения).

Выводы

Проведен расчет поверхностных термооптических переходов. Предположен и реализован кремневый МДП-фототранзистор, применяемый для использования в ближней ИК области излучения. Это обстоятельство позволяет в дальнейшем разработать на его основе приемные оптические модули для волоконно-оптических линий связи.

Список литературы

1. Шевцов Э.А., Белкин М.Е. Фотоприемные устройства волоконо-оптических систем передачи - М.: Радио и связь, 1992. - 224 с.

2. Зуев В.А. Исследование кремниевых МДП-фототранзисторов / В.А. Зуев, В.Г. Попов, А.В. Саченко и др. // Украинский физический журнал - 1977.-т.22, №2. - С.310-316.

3. Loh K.W., Hawkins B.M., Elabd N., Forbes L. Characterization of the gallium-doped infrared sensing A 1 to 2 «m silicon avalanche Photodiode // Pro. JEEF, vol. 24, no. 8, pp. 1041-1148, 1977.

4. Зуев В.А. Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах / [В.А. Зуев, А.В. Саченко, К.Б. Толыпко]. - М.: Сов. Радио, 1977. - 256 с.

5. Кирилова С.И., Примаченко В.Е., Снитко О.В. / Электронные свойства поверхности кремния // Поверхность – 1991.-№11. – С.74-79.

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

Поступила в редакцію 23.01.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Манько, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

КРЕМНІЄВИЙ МДН (МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИК-НАПІВПРОВІДНИК) – ФОТОТРАНЗИСТОР ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ОБЛАСТІ СПЕКТРУ

О.І. Зингаєва

Теоретично і практично кремнієвий МДН-фототранзистор застосовують для інфрачервоної області. Фоторезистор може бути використаний в оптичних лініях зв'язку.

Ключеві слова: *фотодіод, оптичний зв'язок, діфосфід кадмія.*

SILICON MOS (METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR) - PHOTOTRANSISTOR FOR INFRARED SPECTRUM

E.I. Zingaeva

Theoretically and it was investigated the silicon infrared sensing MIS-phototransistor may be used for optical communications.

Keywords: *photodiode, optical, communication, cadmium diphoshide.*