

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

А.В. Осадчук

Винницкий государственный технический университет

Введение

Полупроводниковые структуры с трицательным сопротивлением, в частности лямбда структуры, нашли широкое использование в качестве переключающих, генераторных, логических, пороговых устройств [1-3]. В настоящее время их стараются использовать в качестве датчиков оптического, радиационного, теплового излучений, магнитного поля, давления и других видов воздействия. Однако их широкое использование в качестве сенсорных устройств затрудняется в виду малой изученности их статических и динамических характеристик. Применение полевого транзистора в качестве составного элемента структуры с отрицательным сопротивлением позволяет значительно улучшить электрические и частотные характеристики, получить дополнительные возможности управления.

В данной статье приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований вольт-амперной характеристики структуры и зависимость активной и реактивной составляющих выходного сопротивления от изменения мощности оптического излучения, электрического режима питания, показаны области оптимальной работы устройства.

Статический режим работы

Выбор рабочей точки на вольт-амперной характеристике определяет величину отрицательного сопротивления, задающего работу резонансной схемы фоточувствительного преобразователя, поэтому необходимо знать как изменяется вольт-амперная характеристика от управляющего напряжения.

В основе работы преобразователя оптического излучения лежит механизм взаимодействия светового потока с полевыми транзисторами с изолированным затвором. Преобразователь оптического излучения представляет собой структуру, состоящую из двух комплементарных полевых транзисторов типа КП301 и КП359, схема которой изображена на рис.1, причем электроды истоков соединены между собой, затвор первого полевого транзистора соединен со стоком второго транзистора. Между стоками транзисторов в результате положительной обратной связи возникает полное сопротивление с емкостным характером и отрицательным значением активной составляющей [1].

Рассчитаем вольт-амперную характеристику такой схемы, при этом предполагаем, что пороговые

значения напряжений полевых транзисторов с изолированными затворами одинаковы, т.е. $U_{T1} = -U_{T2}$. В соответствии с принятыми обозначениями на схеме (рис 1.), выходной ток определяется:

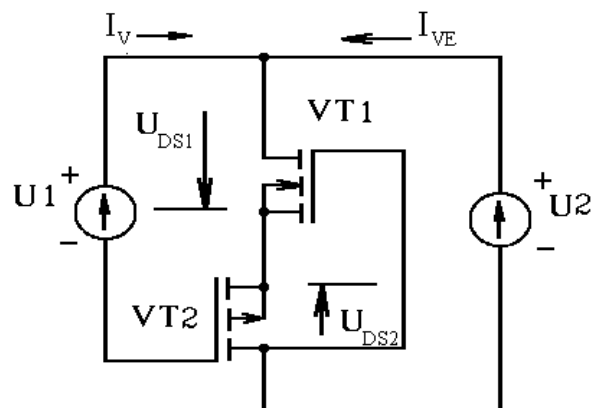


Рис. 1. Электрическая схема фоточувствительного преобразователя

$$I_{VE} = I_{D2} - I_V, \quad (1)$$

где I_{D2} - ток стока полевого транзистора VT2, I_V - входной ток схемы, I_{VE} - выходной ток. Для этого случая напряжение U_1 равно:

$$U_1 = U_{GS1} + U_{DS2}. \quad (2)$$

Тогда, величина входного тока определяется:

$$I_V = \frac{U_1}{R_{GS1} + R_{DS2}}. \quad (3)$$

С другой стороны, значение I_V можно представить:

$$I_V = \frac{U_{GS1}}{R_{GS1}}. \quad (4)$$

На основании (3) и (4) можно записать:

$$\frac{U_1}{R_{G1S1} + R_{D2S2}} = \frac{U_{G1S1}}{R_{G1S1}} \quad (5)$$

Из уравнения (5) определим величину сопротивления:

$$R_{G1S1} = \frac{U_{G1S1} \cdot R_{D2S2}}{U_1 - U_{G1S1}} \quad (6)$$

При подстановке (6) в (3), получим:

$$I_V = \frac{U_1 - U_{G1S1}}{R_{D2S2}} \quad (7)$$

Значение I_{D2} определяется на основании известного выражения при условии, что полевой транзистор работает в линейной области, когда $U_{D2S2} \leq U_{G1S1} - U_T$ [2]:

$$I_{D2} = \frac{Z\mu C_o}{L} \left[(U_{G1S1} - U_T) \cdot U_{D2S2} - \frac{1}{2} U_{D2S2}^2 \right], \quad (8)$$

где Z - ширина канала, L - длина канала, μ - подвижность носителей заряда в канале, C_o - удельная емкость подзатворного диэлектрического слоя. Пороговое напряжение полевого транзистора с изолированным затвором в темновом режиме и при воздействии света выражается уравнениями вида [3]:

$$U_T^T = (2F_f + F_{OX} + U_{PC}) + \left[\frac{2e \epsilon_P \epsilon_P N_d}{C_{OX}^2} (2F_f + U_{IP}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$U_T^{SS} = (2F_f - \Delta F_{fp} + F_{OX} + U_{PC} - U_{TP}) + \left[\frac{2e \epsilon_P \epsilon_P N_d}{C_{OX}^2} (2F_f - \Delta F_{fp} + U_{IP} - U_F) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Здесь обозначения общеприняты. Действие светового потока на область канала МДП-фототранзистора сводится к появлению в выражении порогового напряжения слагаемых $\Delta F_{fp} = F_{fp} - F_f$, U_F , U_{TP} с отрицательным знаком, что приводит к уменьшению порогового напряжения при воздействии света. На основании (1), при подстановке в него (7) и (8), получим:

$$I_{VE} = \frac{Z\mu C_o}{L} \left[(U_{G2S2} - U_T) U_{D2S2} - \frac{1}{2} U_{D2S2}^2 \right] - \left(\frac{U_1 - U_{G1S1}}{R_{D2S2}} \right) \quad (11)$$

В соответствии со схемой (рис.1), можно записать:

$$U_{D2S2} = U_2 - U_{D1S1} \quad (12)$$

$$U_1 = U_2 - U_{G1S1} \quad (13)$$

Подставляя (12) и (13) в (11), получим вольт-амперную характеристику при линейном режиме работы полевых транзисторов:

$$I_{VE} = \frac{Z\mu C_o}{L} \left[(U_{G2S2} - U_{T2})(U_2 - U_{D1S1}) - \frac{1}{2} (U_2 - U_{D1S1})^2 \right] - \frac{(U_2 - U_{G1D1} - U_{G1S1})}{R_{D2S2}} \quad (14)$$

Дифференциальное отрицательное сопротивление определим на основании (14) для линейного режима работы транзисторов:

$$\left[\frac{dI_{VE}}{dU_2} \right]^{-1} = \left\{ \frac{Z\mu C_o}{L} \left[(U_{G2S2} - U_{T2}) - (U_2 - U_{D1S1}) \right] - \frac{1}{R_{D2S2}} \right\}^{-1} \quad (15)$$

Анализ (15) показывает, что участок отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике будет существовать при выполнении условия

$$\left| \frac{Z\mu C_o}{L} (U_2 - U_{D2S2}) + \frac{1}{R_{D2S2}} \right| > \left| \frac{Z\mu C_o}{L} (U_{G2S2} - U_{T2}) \right| \quad (16)$$

При работе полевых транзисторов в режиме насыщения, когда выполняется условие $|U_{D2S2}| \geq |U_{G2S2} - U_{T2}|$, величина тока стока определяется [2]:

$$I_{D2} = \frac{Z\mu C_o}{2L} (U_{G2S2} - U_{T2})^2 = \frac{Z\mu C_o}{2L} U_{D2S2\text{нас}}^2 \quad (17)$$

С учетом (17), выражение (14) преобразуется к виду:

$$I_{VE} = \frac{Z\mu C_o}{2L} (U_{G2S2} - U_{T2})^2 - \frac{U_2 - U_{G1D1} - U_{G1S1}}{R_{D2S2}} \quad (18)$$

На основании (18), найдем значение отрицательно-го сопротивления в режиме насыщения полевых транзисторов:

$$\left[\frac{dI_{VE}}{dU_2} \right]^{-1} = \left\{ \frac{Z\mu C_o}{L} (U_2 - U_{D1S1}) - \frac{1}{R_{D2S2}} \right\}^{-1}. \quad (19)$$

Из (19) видно, что отрицательное сопротивление возникает при выполнении условия

$$\left| \frac{Z\mu C_o}{L} U_{D1S1} + \frac{1}{R_{D2S2}} \right| > \left| \frac{Z\mu C_o}{L} U_2 \right|. \quad (20)$$

На рис.2 представлена теоретическая и экспериментальная зависимость вольт-амперной характеристики.

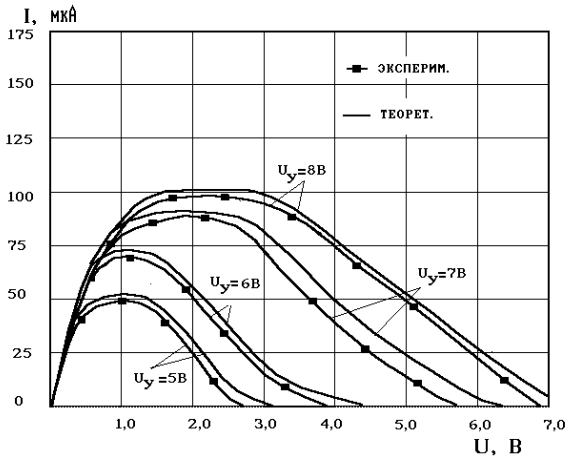


Рис.2. Расчетная и экспериментальные вольт-амперные характеристики фоточувствительного преобразователя.

Динамический режим работы

Для увеличения чувствительности и точности измерения мощности светового потока необходимо создать резонансную схему, в которой мощность светового излучения была бы однозначно связана с резонансной частотой такой схемы [4]. Это возможно сделать, если в качестве емкости колебательного контура системы выбрать полупроводниковую структуру с отрицательным сопротивлением на основе двух комплементарных МДП фоточувствительных транзисторов. Подключение внешней индуктивности к зажимам стоков полевых транзисторов с изолированным затвором позволяет получить автогенератор электрических колебаний [5]. При воздействии оптического излучения на затворы полевых транзисторов в области каналов образуются полнителиные электронно-дырочные заряды, которые приводят к изменению емкости колебательного контура. Таким образом, резонансная частота автогенератора связана с оптическим излучением. Физические процессы в полевых транзисторных структурах описываются при помощи эквивалентных

схем, которые позволяют связать параметры транзисторов с приложенными напряжениями. Таким образом, для анализа поведения функционального преобразователя от изменения частоты, режимов питания, мощности светового потока и других параметров, необходимо получить аналитическую зависимость величины активной и реактивной составляющей полного сопротивления данной структуры от указанных выше параметров. Для этих целей предложена эквивалентная схема фоточувствительного преобразователя, имеющая достаточную точность для рабочих частот до 100 МГц, которая изображена на рис.3. Для расчета необходимо преобразовать схему на рис.3 в эквивалентную схему, представленную на рис.4, и рассчитать полное сопротивление на зажимах сток-сток полевых

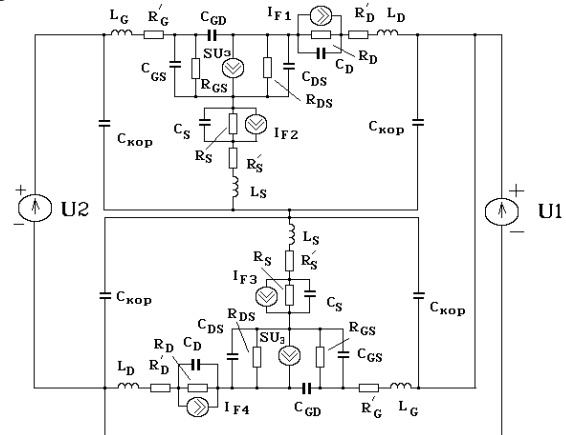


РИС.3. Высокочастотная эквивалентная схема фоточувствительного преобразователя.

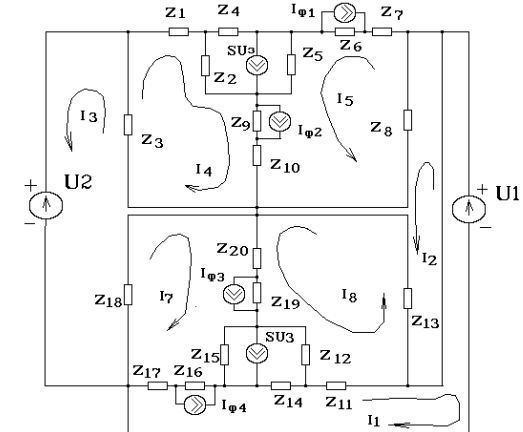


РИС.4. Преобразованная высокочастотная эквивалентная схема фоточувствительного преобразователя.

транзисторов. Расчет проведем при помощи системы уравнений Кирхгофа на основании метода контурных токов. При проведении расчета считаем, что транзисторы работают на частотах, не превышающих граничную частоту f_a. Система уравнений Кирхгофа в соответствии с выбранными направлениями контурных токов имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= (Z_{17} + Z_{16} + Z_{14} + Z_{11})i_1 - (Z_1 + Z_{16})i_7 + Z_{11}i_8 - \\
 &- Z_{14}i_9 - Z_{16}I_{F4}; \\
 0 &= (Z_8 + Z_{13})i_2 + Z_8i_5 + Z_{13}i_8; \\
 U_2 &= (Z_3 + Z_{18})i_3 + Z_3i_4 + Z_{18}i_7; \\
 0 &= -Z_8i_2 + (Z_9 + Z_{10} - Z_5S_1Z_2)i_4 + Z_6I_{F1} - Z_9I_{F2} + \\
 &+ (Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9 + Z_{10})i_5 - (Z_5 + Z_5S_1Z_2)i_6; \\
 0 &= Z_3i_3 + (Z_1 + Z_2 + Z_9 + Z_{10} + Z_3)i_4 + (Z_9 + Z_{10})i_5 + \\
 &+ Z_2i_6 - Z_9I_{F2}; \\
 0 &= (Z_2 + Z_5S_1Z_2)i_4 - Z_5i_5 + (Z_2 + Z_4 + Z_5 - Z_5S_1Z_2)i_6; \\
 0 &= -(Z_{17} + Z_{16})i_1 + Z_{18}i_3 - Z_{19}I_{F3} + Z_{16}I_{F4} + \\
 &+ (Z_{15} + Z_{16} + Z_{17} + Z_{18} + Z_{19} + Z_{20})i_7 - (Z_{15} + Z_{15}S_2Z_{12})i_9 + \\
 &+ (Z_{20} + Z_{19} - Z_{15}S_2Z_{12})i_8; \\
 0 &= Z_{11}i_1 - Z_{13}i_2 + (Z_{20} + Z_{19})i_7 + Z_{12}i_9 - Z_{19}I_{F3} + \\
 &+ (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{19} + Z_{20})i_8; \\
 0 &= -Z_{14}i_1 - Z_{15}i_7 + (Z_{12} + Z_{14} + Z_{15} - Z_{15}S_2Z_{12})i_9 + \\
 &+ (Z_{12} + Z_{15}S_2Z_{12})i_8.
 \end{aligned} \tag{21}$$

где

$$Z_1 = R_G + jL_G; \quad Z_3 = -j/(\omega C_{КОР});$$

$$Z_4 = -j/(\omega C_{ДС}); \quad Z_8 = -j/(\omega C_{КОР});$$

$$Z_7 = R_D + jL_D; \quad Z_{10} = R_S + jL_S;$$

$$Z_2 = \frac{R_{GS}}{1 + \omega^2 R_{GS}^2 C_{GS}^2} - \frac{j R_{GS}^2 \omega C_{GS}}{1 + \omega^2 R_{GS}^2 C_{GS}^2};$$

$$Z_5 = \frac{R_{DS}}{1 + \omega^2 R_{DS}^2 C_{DS}^2} - \frac{j R_{DS}^2 \omega C_{DS}}{1 + \omega^2 R_{DS}^2 C_{DS}^2};$$

$$Z_6 = \frac{R_D}{1 + \omega^2 R_D^2 C_D^2} - \frac{j R_D^2 \omega C_D}{1 + \omega^2 R_D^2 C_D^2};$$

$$Z_9 = \frac{R_S}{1 + \omega^2 R_S^2 C_S^2} - \frac{j R_S^2 \omega C_S}{1 + \omega^2 R_S^2 C_S^2};$$

$$Z_{11} = Z_1; \quad Z_{12} = Z_2; \quad Z_{13} = Z_3;$$

$$Z_{14} = Z_4; \quad Z_{15} = Z_5; \quad Z_{16} = Z_6;$$

$$Z_{17} = Z_7; \quad Z_{18} = Z_8; \quad Z_{19} = Z_9; \quad Z_{20} = Z_{10}.$$

R_G - омическое сопротивление электрода затвора, L_G - индуктивность электрода затвора, R_{GS} - сопротивление между электродами затвора и истока, C_{GS} - емкость затвор-исток, C_{GD} - емкость затвор-

сток, R_{DS} - сопротивление сток-исток, C_{DS} - емкость сток-исток, R_D - сопротивление p-n перехода стока, C_D - емкость p-n перехода истока, L_S - индуктивность электрода истока, I_F - значение фототока p-n переходов стока и истока, $C_{КОР}$ - емкость корпуса полевого транзистора.

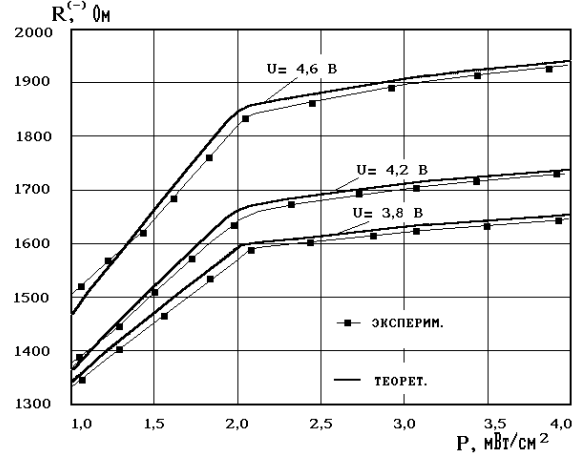


РИС.5. Теоретическая и экспериментальная зависимости отрицательного сопротивления от мощности оптического излучения.

Решение системы уравнения (21) проведено методом Гаусса на персональной ЭВМ IBM PC/AT в среде пакета прикладных программ "Matlab". Это дало возможность определить полное сопротивление на электродах стоков VT1 и VT2. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при значениях крутизны больше чем 3 мА/В величина отрицательного сопротивления в малой степени зависит от частоты, хотя при значениях крутизны меньше чем 1 мА/В эта зависимость довольно сильная, что приводит к двухразовому уменьшению отрицательного сопротивления при изменении частоты от 5 до 15 МГц. Реактивная составляющая имеет сложный характер и изменяется от емкостного до индуктивного характера при увеличении частоты. Как видно из рис.5, наблюдается почти линейное возрастание отрицательного сопротивления на 15,7% при изменении мощности светового потока от 0 до 2 мВт/см² при напряжении питания 3,8 В, а при напряжении питания 4,6 В отрицательное сопротивление возрастает на 20,3%. Расчетная и экспериментальная зависимость реактивной составляющей полного сопротивления фоточувствительного преобразователя на двух МДП-транзисторах от мощности светового потока приведена на рис.6. Реактивная составляющая изменяется на 5,3% при изменении мощности светового потока от нуля до 2,5 мВт/см². Опри напряжении 3,8 В.

На рис.7 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости отрицательного сопротивления от изменения напряжения питания при разных значениях мощности оптического излучения.

Анализ хода кривых показывает, что оптимальным участком управления величиной отрицательного сопротивления является интервал напряжений от 4 В до 5,2 В. Наибольшее изменение отрицательного сопротивления наблюдается при изменении мощности оптического излучения от нуля до 2 мВт/см^2 , дальнейшее увеличение мощности светового потока практически в малой степени изменяет отрицательное сопротивление. Это объясняется насыщением каналов полевых транзисторов носителями зарядов за счет действия света. Теоретическая и экспериментальная зависимости реактивной составляющей от изменения напряжения питания при разных значениях мощности оптического излучения представлены на рис.8. Как видно из анализа хода кривых, величина емкостного сопротивления резко возрастает с увеличением напряжения питания, что объясняется уменьшением эквивалентной емкости структуры. Действие света уменьшает реактивную составляющую за счет увеличения эквивалентной емкости преобразователя в результате возрастания количества носителей заряда.

На рис.9 и 10 показаны расчетные зависимости отрицательного сопротивления и сопротивления реактивной составляющей от изменения мощности светового потока при разных длинах волн.

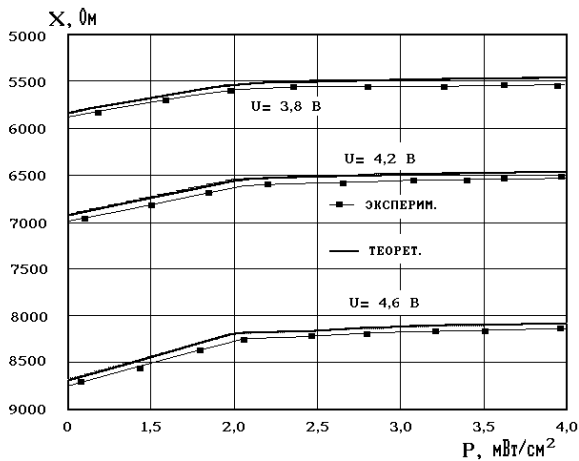


РИС.6. Теоретическая и экспериментальная зависимости реактивной составляющей от мощности оптического излучения.

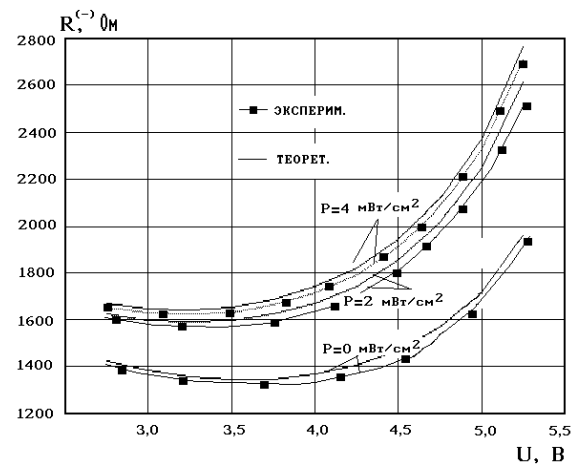


РИС.7. Теоретическая и экспериментальная зависимости отрицательного сопротивления от изменения напряжения питания.

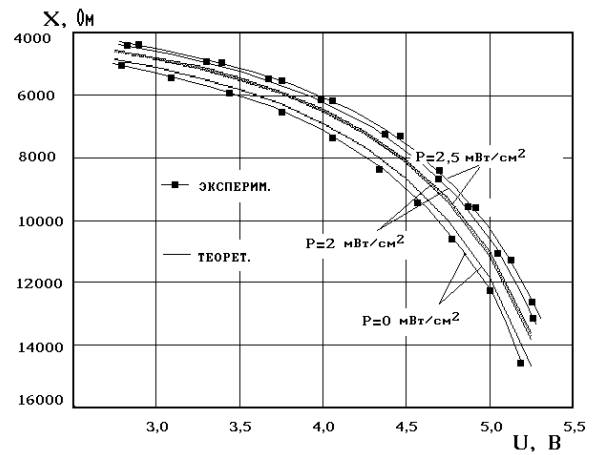


РИС.8. Теоретическая и экспериментальная зависимости реактивной составляющей от изменения напряжения питания.

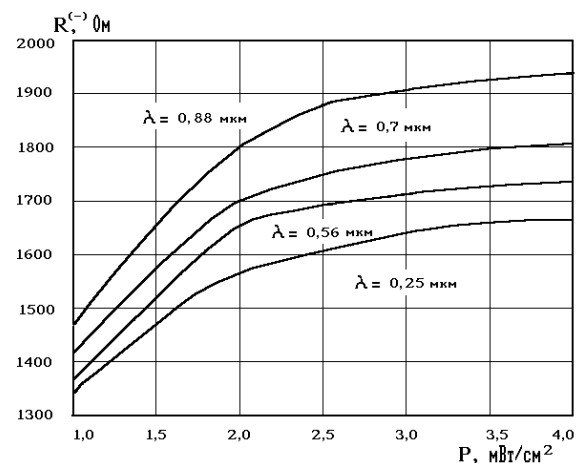


РИС.9. Теоретическая зависимость отрицательного сопротивления от мощности оптического излучения.

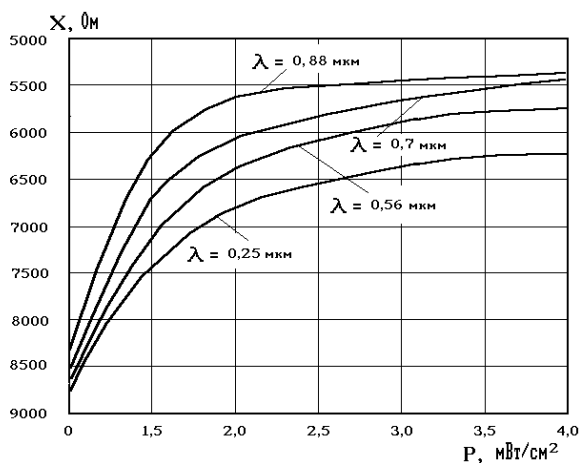


РИС.10. Теоретическая зависимость реактивной составляющей от мощности оптического излучения.

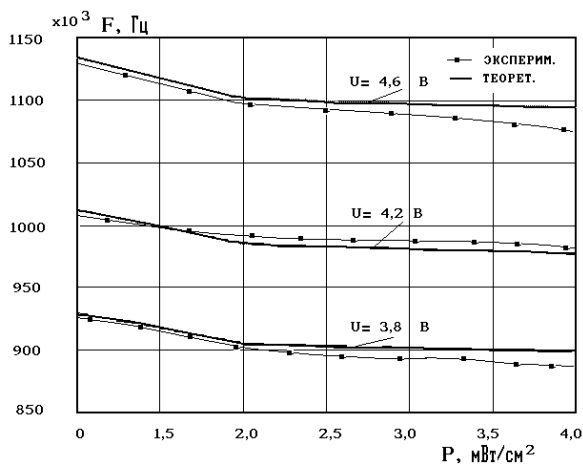


РИС.11. Теоретическая и экспериментальная зависимости частоты генерации от мощности оптического излучения.

Как видно из рисунков, увеличение длины волны и приближении ее значения к максимуму спектральной характеристики кремния увеличивает отрицательное сопротивление и уменьшает сопротивление реактивной составляющей. Это объясняется тем, что все большая часть носителей заряда генерируется в активных областях транзисторов, что увеличивает эквивалентную емкость и снижает сопротивление каналов.

Выводы

Проведен расчет вольт-амперной характеристики фоточувствительного преобразователя. Определены условия возникновения отрицательного сопротивления. Разработана математическая модель фоточувствительного преобразователя, которая позволила получить аналитические зависимости величины отрицательного сопротивления, реактивной составляющей от изменения частоты, питающих напряжений, крутизны, мощности оптического излучения. Экспериментально подтверждена возможность

построения фоточувствительных преобразователей с частотным выходом.

Литература

1. С.-Y. Wu, Hong-Dahsheng and Yao-Tsong Tsai. The lambda bipolar phototransistor-analysis and applications. IEEE Solid-State Circuits, vol. sc 20, 1 6, december, 1985.
2. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. -М.: Высш.школа., 1991.- 351с.
3. Клетченков И.И., Плашенков Р.И., Карпов А.И. Исследование и разработка светоприемного устройства на основе МДП-структуры. -К.:Диэлектрики и полупроводники. вып. 18. 1980. с.91-96.
4. Осадчук В.С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах. - К.:Высш. Школа, 1987, - 155 с.
5. Осадчук В.С., Осадчук А.В., Осадчук Е.В. Полупроводниковый датчик освещенности. Патент Российской Федерации №2086042. Зарег. в Гос. реестре изобретений 27.07.97. Бюл. № 21.