НОВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КРЕМНИИ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ

М.К.Бахадырханов, С.Б.Исамов, Х.М.Илиев, Х.У.Камалов

В работе исследованы особенности фотопроводимости кремния с многозарядными нанокластерами атомов марганца. Показано, что в таких образцах наблюдается смещение собственной фотопроводимости от hv=1,12 эВ к hv=0,7÷0,8 эВ и наблюдается эффект очувствления примесной области падающего света без фонового освещения.

***Ключевые слова**: кремний, фотопроводимость, многозарядный нанокластер, эффект очувствления.*

The artcle discusses the particularities of photoconductivity in silicon with multi-charge nanoclusters of manganese atoms. It was shown that in such samples the authors revealed overlap of intrinsic photoconductivity in the range from hv=1,12 eV to hv=0,7÷0,8 eV and the effect of sensibility of impurity range of incident light without background irradiation.

***Key words**: silicon, photoconductivity, multi-charge nanocluster, effect of sensibility.*

Нанокластеры примесных атомов в полупроводниках – это не только новые электронные состояния [1], но и наностуктур-квантовые точки с уникальными электрофизическими параметрами. Уникальность таких наноструктур заключается в том, что в зависимости от электрофизических и химических параметров примесных атомов они могут действовать как магнитные, многозарядные и бинарные кластеры, позволяющие не только существенно расширить функциональные возможности, но и выявить еще неизвестные грани квантовых точек.

В данной работе приводится ряд оригинальных и новых фотоэлектрических явлений, обнаруженных в кремнии с многозарядными нанокластерами атомов марганца. Как было показано в работе [2], при определенных термодинамических и технологических условиях легирования в кремнии формируются нанокластеры, состоящие из четырех ионов атомов марганца ($Mn^{+}Mn^{++}$), находящихся в ближайших междуузельных состояниях вокруг отрицательно заряженного атома бора. При определенных положениях уровня Ферми в кремнии нанокластеры атомов марганца обладают максимальным зарядовым состоянием $[(Mn)^{+8}B^{-1}]^{+7}$ [3], т.е. появляются многозарядные квантовые точки нового типа, которые еще не были созданы другими методами в полупроводниковых материалах. Для получения образцов с нанокластерами атомов марганца был использован в качестве исходного материала монокристаллический кремний *p*-типа с ρ~3 ом·см (N_B=7·10^{15} см$^{-3}$). После диффузионного легирования остались образцы *p*-типа с удельным сопротивлением ρ~(5÷6)·10^{3}ом·см при *T*=300 К.

Фотоэлектрические свойства образцов исследовались на установке ИКС-21, снабженной специальным криостатом, позволяющим проводить исследования в широком интервале температуры, электрического поля и ИК спектра. Для избежания попадания фонового света ($h\nu \geq E_g$) криостат был снабжен двумя фильтрами из полированного монокристаллического кремния толщиной *d*~350 мкм. Нами были изготовлены две партии образцов с одинаковыми электрическими параметрами. Первая партия образцов была с нанокластерами атомов марганца, вторая партия образцов была легирована марганцем без образования нанокластеров. В обоих случаях исходный материал был *p*-типа с ρ~3 ом·см (N_B=7·10^{15} см$^{-3}$), но технология легирования была различна.

Удельное сопротивление ρ~(5÷6)·10^{3}ом·см, положение уровня ферми $F=E_V$+0.38 эВ, т.е.

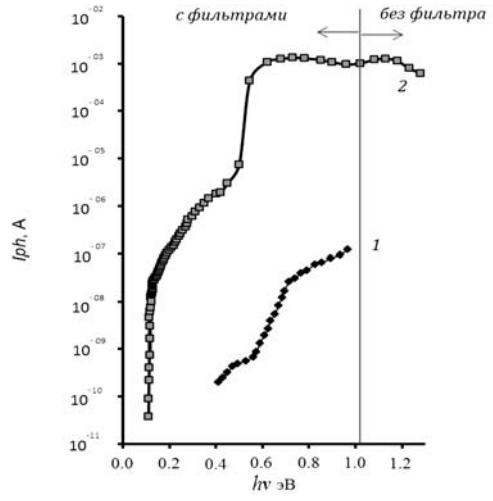

Рис. 1. Спектральная зависимость кремния легированного марганцем: 1 – без образования нанокластеров, 2 – с нанокластерами.

p-тип. Как видно из рис1 (кривая1) в образцах без нанокластеров (II-партии образцы) фотоответ начинаются при *hv*=0,5 эВ (*λ*~5 мкм), фототок слабо увеличивается с ростом энергии падающих фотонов. Следует учесть, что в образцах с $F=E_V$+0.38 эВ два донорных уровня марганца ($E_1=E_C$-0,27 эВ и $E_2= E_C$-0,5 эВ) практически пустые от электронов и фототок наблюдется только при переходе электронов из валентной зоны на второй энергетический уровень марганца, что имеет место в эксперименте.

На рис. 1. представлена спектральная зависимость фотопроводимости кремния с нанокластерами атомов марганца и кремния легированного марганцем без образования нанокластеров.

Интересные результаты были получены в образцах первой партии (кривая 2). При этом наблюдаются три новых фотоэлектрических эффекта. Как видно, в этих образцах фотоответ начинается при *hv*=0,12 эВ (λ=10 мкм). Аномалия при этом заключается в том, что, во-первых, атомы марганца не создают какие-либо энергетические уровни с энергией ионизации E_1=0,12 эВ, а во-вторых, этот уровень теоретически никак не может участвовать в фотоответе, так как уровень ферми в исследуемых образцах находится на $F=E_V+0.38$ эВ. Если он находится около зоны проводимости, то должен быть абсолютно пустым от электронов. Поэтому переход электронов с этого уровня в зону проводимости не имеет места, а если этот уровень находится около валентной зоны, то он должен быть заполнен электронами, т.е. переход электрона из валентной зоны на этот уровень для обеспечения фототока невозможен. При этом следует отметить, что не только при *T*=160 К, но и при *T*=77 К в кремнии легированном различными примесными атомами наблюдается фотоответ при λ=10мкм теоретически и экспериментально наблюдать невозможно. Второй фотоэффект обеспечивает непрерывный и достаточно высокий рост фотопроводимости в области *hv*=0,12÷0,8 эВ (λ=10÷15 мкм). Третий фотоэффект – это аномально большая примесная фотопроводимость в области *hv*=0,6÷0,8 эВ без существенного изменения значения фототока в собственной области поглощения (кривая 2), т.е. смешение собственной фотопроводимости от *hv*=1,12 эВ к hv=0,7÷0,8 эВ.

Как известно, долговременная релаксация и остаточная фотопроводимость (ОП) имеют место в сильнокомпенцированных полупроводниках после освещения их собственным светом $hv \geq Eg$ [4], это связано с пространственным разделением электронов и дырок в различных потенциальных ямах. Однако, как нам известно, отсутствуют какие-либо экспериментальные данные об обнаружении эффекта долговременной релаксации и ОП в полупроводниках при освещении их примесным светом $hv \leq Eg/2$.

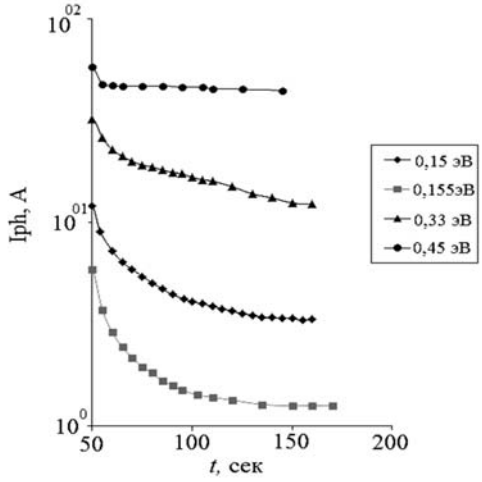

Рис. 2. Релаксация фотопроводимости кремния с нанокластерами атомов марганца при различной энергии ИК излучения.

На рис. 2 представлена релаксация и значение примесной остаточной проводимости в исследуемых образцах при *hv*=0,15÷0,45 эВ. Как видно, в интервале *hv*=0,15-0,4 эВ после прекращения освещения наблюдается то, что, во-первых, релаксация фототока происходит очень медленно, т.е. имеет место аномально долговременная релаксация с $\tau \sim 10^5$-10^7с, а, во-вторых, обнаружена очень высокая примесная ОП, значение которой существенно

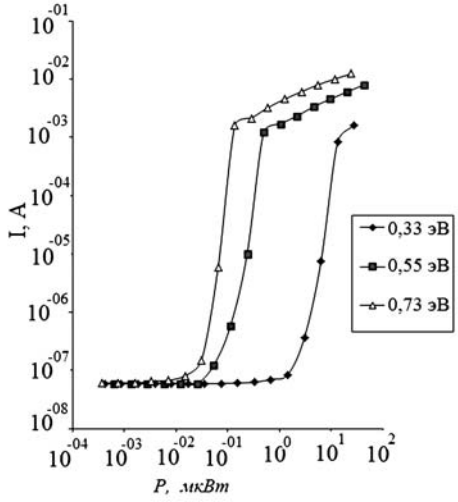

Рис. 3. Ватт-амперная характеристика фотопроводимости кремния с нанокластерами атомов марганца.

зависит от энергии падающих фотонов. При этом нами был обнаружен еще один интересный эффект, т.е. существенное уменьшение времени релаксации примесной ОП в области *h*ν=0,42-0,45 эВ. В образцах без нанокластеров в исследуемой области спектра не было обнаружено ни долговременной релаксации, ни заметной ОП.

Эффект очувствления имеет место в очень многих полупроводниках. Этот эффект объясняется перезарядкой рекомбинационных и очувствляющих энергетических уровней при освещении полупроводников с определенной интенсивностью собственным светом [5-6].

На рис. 3 представлена ватт-амперная характеристика исследуемых образцов в примесной области освещения *h*ν=0,33-0,75 эВ с различной мощностью. Мощность ИК изучения управлялась фильтрами и измерялась специальными приборами. При этом следует отметить очень низкий уровень мощности ИК излучения. Как видно, в области очень низкой мощности излучения фототок увеличивается медленно, а при достижении определенной мощности фототок резко увеличивается на несколько порядков, т.е. имеет место эффект очувствления пороговой мощности. Эффект очувствления зависит от энергии падающих фотонов. Важность и аномалия полученных эффектов при этом заключается в том, что эффект очувствления, во-первых, наблюдается в примесной области поглощения (*h*ν<Eg/2), а, во-вторых, при достаточно низкой мощности излучения. Насколько нам известно, подобные эффекты не были обнаружены ни в каких чувствительных полупроводниковых материалах, в том числе в кремнии легированном марганцем без формирования нанокластеров.

Следующий интересный эффект, обнаруженый в исследуемых образцах, – это влияние электрического поля в интервале *E*=1-40 В/см на спектральную фоточувствительность. При этом установлено, что с ростом электрического поля фототок в исследуемой области спектра увеличивается по суперлинейному закону $J \sim E^n$ (рисунок 4).

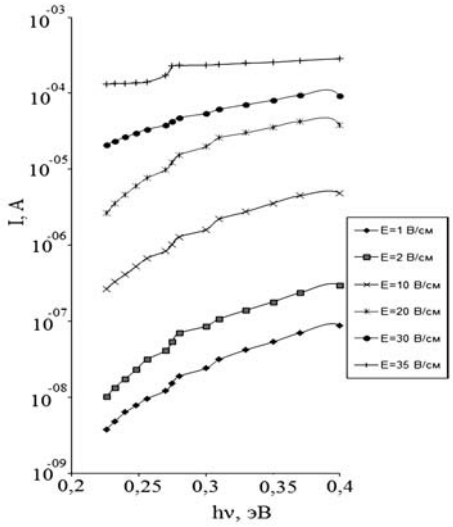

Рис. 4. Нарастание фототока при воздействии различных энергий ИК излучения в кремнии с нанокластерами атомов марганца.

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что они не связаны с энергетическими уровнями изолированных атомов марганца и не могут быть объяснены существующими двухуровневыми моделями, а также электронным состоянием в обычной квантовой точке. Поэтому можно предположить, что многозарядные нанокластеры существенно меняют не только энергетическую структуру электронов в квантовой точке, но также происходит существенная перестройка энергетической структуры вокруг многозарядного кластера.

Литература:

1. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках.- М.: Мир, 1977.

2. Kreissl J., Gehlhoff W. Electron Paramagnetic Resonance of the M_4^0 Cluster in Silicon // phys.stat.sol. 1988 – V.145 (b).– P. 609-616.

3. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Зикриллаев Н.Ф. Особенности вольт-амперной характеристики кремния с нанокластерами атомов марганца. // Неорганические материалы, 2014, том 50, №4.- С. 353-357.

4. Шик А.Я. Магнитосопротивление неоднородных полупроводников. ФТП 1975, том 9, №5, С. 872-875.

5. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел // М.: ИЛ. 1962.- 559 с.

6. Роуз Л., под ред. С.М. Рывкина. Основы теории фотопроводимости.- М.: Мир, 1966.

Тошкент давлат техника университети,
2017 йил 6 январда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. С.Зайнобидинов)