

Влияние концентрации электроактивных атомов марганца на фотоэлектрические свойства кремния в условиях сильной компенсации

Саъдуллаев А. Б.¹, Норбоев А. Э.²

¹Саъдуллаев Аловиiddин Бобакулович / *Sadullaev Aloviddin Bobakulovich* - кандидат физико-математических наук, доцент;

²Норбоев Анвар Эшмутинович / *Norbоеv Anvar Eshmutinovich* - старший преподаватель, кафедра электроэнергетики, энергетический факультет, Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Республика Узбекистан

Аннотация: в статье рассматривается исследование особенности фотоэлектрического свойства кремния легированным марганцем в условиях сильной компенсации, и установлены возможности управления чувствительности образцов на инфракрасный свет при наличии фонового освещения, управляя концентрацией электроактивных атомов марганца, и определено оптимальное удельное сопротивление, а также предложена нанокластерная модель, позволяющая объяснить наблюдаемый эффект в сильнокомпенсированном кремнии.

Ключевые слова: сильнокомпенсированный кремний, кратность гашения фотопроводимости, метастабильные нанокластеры.

В условиях сильной компенсации в полупроводниках концентрация равновесных носителей тока становится в сотни, тысячи или миллионы раз меньше, чем концентрации ионизированных примесных атомов в кристаллической решётке, что имеет место при температуре $T = 300\text{ K}$, а с понижением температуры эта разница ещё более увеличивается. В этом случае, т. е. в условиях сильной компенсации система находится в крайне неравновесном состоянии. Воздействие малейших внешних факторов (температуры, освещённости, электрического и магнитного поля) приводит к существенному изменению условия взаимодействия дефектов и носителей тока [1-6].

В связи с этим целью данной работы являлось исследование влияния концентрации электроактивных атомов марганца на фотоэлектрические свойства кремния в условиях сильной компенсации, а также определить взаимосвязи между электрофизическими параметрами и фотоэлектрическими свойствами кремния и выяснить физику наблюдаемых эффектов в таких материалах.

В качестве объекта исследования был выбран $\text{Si} < \text{B} >$, компенсированный марганцем. Такой выбор материала и компенсирующих примесей продиктован тем, что технология получения компенсированного кремния, легированного марганцем, достаточно хорошо отработана, что и позволило получить материал с различной степенью компенсации и воспроизводимыми, стабильными параметрами, а также обеспечило получение достоверных результатов.

Для исследования в качестве исходного материала был использован промышленный монокристаллический кремний p-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 1; 5; 10; 100; 200\text{ Ом}\cdot\text{см}$, при этом концентрация атомов легирующей примеси бора в этих образцах составляло $N_B = 2 \cdot 10^{16}; 4 \cdot 10^{15}; 2 \cdot 10^{15}; 2 \cdot 10^{14}; 10^{14}\text{ см}^{-3}$ соответственно. Из каждого исходного материала было изготовлено по 10 образцов с одинаковыми геометрическими размерами. Диффузия марганца проводилась из газовой фазы с таким расчетом, чтобы независимо от исходной концентрации бора в кремнии были получены компенсированный кремний с удельным сопротивлением $\rho = 10^2 \div 10^5\text{ Ом}\cdot\text{см}$. В итоге для исследования были подобраны сильно компенсированные образцы p-Si<B,Mn> кристаллическим направлением [111] с одинаковыми геометрическими размерами и удельным сопротивлением, только отличающейся концентрацией компенсирующей примеси марганца. При этом концентрация электрически активных атомов марганца в образцах p-Si<B,Mn> изменялась в интервале $N_{Mn} = 1 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$.

Исследование спектральной зависимости фотопроводимости в температуре $T=77\text{ K}$ при наличии фонового освещения образцов p-Si<B,Mn> с различными концентрациями электроактивных атомов проводилась на установке ИКС-21, снабженное специальным криостатом, дающим возможность изучения спектральной зависимости фотопроводимости в широком интервале температур, электрического поля с различной интенсивности фонового и инфракрасного освещения. Фоновое освещение создавалось обычным интегральным освещением различной интенсивности. После установления стационарного значения фонового фототока снималась спектральная примесная фотопроводимость в области энергии фотонов инфракрасного света $h\nu = 0.2 \div 1.1\text{ эВ}$.

Результаты исследования спектральной зависимости фотопроводимости при различной концентрации электроактивных атомов марганца показало, что в образцах p-Si<B, Mn> с удельным сопротивлением $\rho = 2 \cdot 10^5\text{ Ом}\cdot\text{см}$ и максимальной концентрации электроактивных примесей $N_{Mn}=10^{16}\text{ см}^{-3}$, освещение образцов слабым интегральным светом приводит к существенному увеличению фотопроводимости материала, и фототок при этом увеличивается на 6÷7 порядков (Рис. 1, крив. 1). После установления стационарного значения фототока образец p-Si<B,Mn> дополнительно освещался инфракрасным светом в интервале энергии фотонов $h\nu = 0.2 \div 1.1\text{ эВ}$ с мощностью $P=10^{-5}\text{ Вт/см}^2$.

Как видно из рисунка (крив. 1), в образцах p-Si<B, Mn> с максимальной концентрации электроактивных примесей в интервале энергии падающих фотонов монохроматического света $h\nu = 0.4 \div 0.45 \text{ эВ}$ наблюдается аномально глубокое инфракрасное гашение фотопроводимости, где кратность гашения, т. е.

уменьшение фототока относительно значения фонового тока ($k = \frac{I_\phi}{I_{\phi+ИК}}$, где I_ϕ - значение фонового фототока, $I_{\phi+ИК}$ - значение фототока при дополнительном освещении инфракрасным светом) достигает 5÷6 порядков. Дальнейший рост энергии падающих фотонов в интервале $h\nu = 0.45 \div 0.7 \text{ эВ}$ приводит к непрерывному увеличению значения фототока в $10^9 \div 10^{10}$ раз, а в интервале $h\nu = 0.7 \div 1.1 \text{ эВ}$ значение фототока существенно не изменяется (Рис. 1, крив. 1).

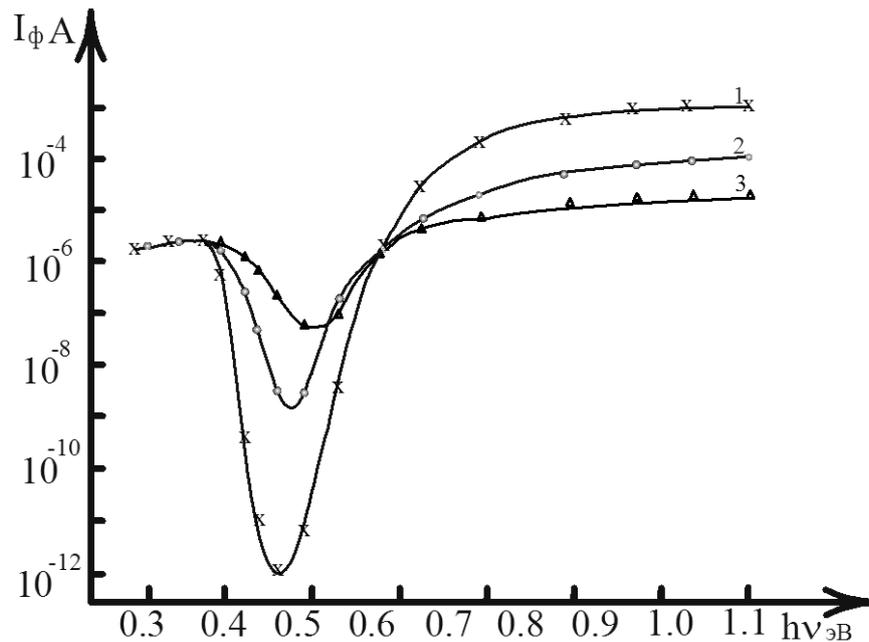


Рис. 1. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов p-Si<B, Mn> с $\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, при различной концентрации электроактивных атомов марганца $N_{Mn} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2. $N_{Mn} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 3. $N_{Mn} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$

Показано, что с увеличением концентрации электроактивных атомов марганца глубина гашения увеличивается, а энергия, соответствующая максимуму гашения, смещается в сторону меньших энергий падающих фотонов инфракрасного света при этом, а также сужается область гашения.

Установлено, что в области с энергией монохроматического света $h\nu = 0.4 \div 0.45 \text{ эВ}$ образцы p-Si<B, Mn> работают как счётчик, регистрирующий каждый фотон инфракрасного света. Эти результаты показывают возможность создания нового класса высокочувствительных фотоприёмников инфракрасного излучения в интервале энергии фотонов $h\nu = 0.4 \div 0.7 \text{ эВ}$, регистрирующих слабые потоки инфракрасного света при наличии достаточно сильного фонового интегрального света.

Результаты исследования спектральной зависимости фотопроводимости показали, что в сильнокомпенсированных образцах p-Si<B, Mn> с удельным сопротивлением $\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, где концентрация электро-активных компенсирующих примесей марганца составляет $N_{Mn} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, кратность гашения при одновременно освещении образцов инфракрасным и фоновым светом на 3-4 порядка меньше, чем в образцах с удельным сопротивлением $\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и концентрации электроактивных компенсирующих примесей марганца $N_{Mn} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (Рис. 1, крив. 1 и 3). Из рисунка видно, что начало инфракрасного гашения фотопроводимости хотя и не зависит от концентрации электроактивных атомов марганца, скорость и глубина гашения фотопроводимости резко увеличивается с ростом концентрации электроактивных компенсирующих примесей.

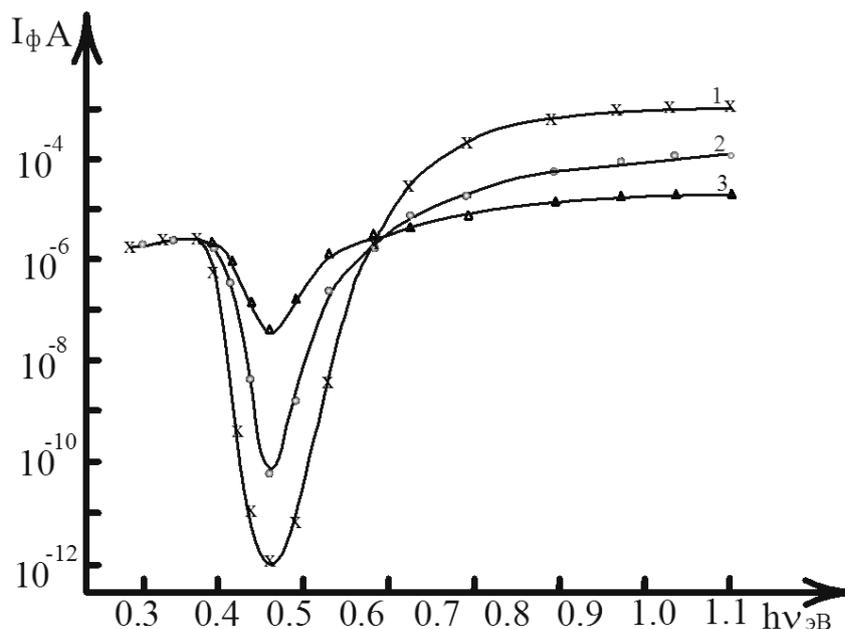


Рис. 2. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ с $\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и $N_{\text{Mn}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при различной интенсивности (мощности) инфракрасного света
 $P = 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ 2. $P = 6.2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; 3. $P = 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$

На рисунке 2 представлена спектральная зависимость фотопроводимости образцов $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и максимальной концентрации электроактивных компенсирующих примесей марганца $N_{\text{Mn}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при постоянном значении фонового и различной интенсивности (мощности) инфракрасного света. Интенсивность инфракрасного света управлялась с помощью эталонного фильтра в интервале $P = 10^{-5} \div 10^{-9} \text{ Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$. Результаты исследования показали, что с уменьшением интенсивности инфракрасного света начало и положение максимума гашения не изменяется, а кратность гашения фотопроводимости уменьшается.

Установлено, что в зависимости от значения фонового фототока минимальная пороговая мощность падающего инфракрасного света составляет $P = 10^{-9} \text{ Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$. Результаты исследований показали, что когда концентрация электроактивных компенсирующих примесей марганца составляла $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, независимо от концентрации исходного бора и удельного сопротивления, в сильнокомпенсированных образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ наблюдается инфракрасное гашение фотопроводимости, но кратность гашения при этом изменяется всего $\kappa = 1 \div 1.8$ порядок. Верхняя граница концентрации электроактивных атомов марганца ограничивается с $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что соответствует максимальной предельной растворимости марганца в кремнии.

Таким образом, установлены граничные концентрации электроактивных атомов марганца, при которых наблюдается аномально глубокое инфракрасное гашение фотопроводимости, в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ должны находиться в интервале $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. На основе полученных результатов показана возможность управления фоточувствительности образцов $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ на инфракрасный свет при наличии фонового освещения, управляя концентрациями электроактивных атомов марганца. Определены оптимальное удельное сопротивление и концентрации электроактивных компенсирующих примесей марганца в кремнии.

Из полученных результатов следует, что существующая модель инфракрасного гашения фотопроводимости в полупроводниках не в состоянии объяснить наблюдаемые эффекты в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ с максимальной концентрацией электроактивных примесей марганца. Поэтому на основе результатов исследований влияние концентрации электроактивных атомов марганца на фотоэлектрические свойства кремния в условиях сильной компенсации предлагаем нанокластерную модель, учитывая особенности поведения компенсирующих примесей в сильнокомпенсированном кремнии. На основе этой модели примесные атомы марганца в кремнии создают энергетическую полосу, лежащую в интервале $\Delta E = (E_V + 0,42) \div (E_C - 0,4) \text{ эВ}$ и существенно отличающихся с сечениями захвата носителей заряда и могут находиться в кристаллической решетке Mn^0 ; Mn^+ ; Mn^{++} состояниях. В образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ в условиях сильной компенсации положение зарядового состояния, окружение примесных атомов в кристаллической решетке и их взаимодействие постоянно меняются с изменением внешних воздействий на материалы. Это означает, что в таких материалах постоянно генерируются и исчезают различные метастабильные

нанокластеры: примес-примес, примес-дефект, примес-носителей тока соответственно в зависимости от неравновесного состояния материала.

Расчёты полученных результатов показывают, что наблюдаемое аномально глубокое гашение фотопроводимости в образцах p-Si<В,Мп> связано с наличием центров с маленькими сечениями захвата дырок многозарядными метастабильными нанокластерами.

Литература

1. Бахадырханов М. К., Мавлянов Г. Х., Аюпов К. С., Исамов С. Б. Отрицательное магнитосопротивление в кремнии с комплексами атомов марганца. Физика и техника полупроводников. 2010 г., т. 44, в. 9, с. 1181-1184.
2. Аюпов К. С., Бахадырханов М. К., Зикриллаев Н. Ф., Мавлянов Г. Х. Активации нанокластеров атомов марганца в кремнии. Доклады АНРУз. Ташкент, 2009 г., № 3, с. 56-58.
3. Бахадырханов М. К., Зикриллаев Н. Ф., Хамидов А. О концентрации электроактивных атомов элементов переходных групп в полупроводниках. Uzbek journal of physics. Volume 2, Number 3, 2000, p. 221-225.
4. Zikrillaev N. F., Sadullaev A. B. Power spectra of impurity in semiconductors in the condition of strong compensation. SSP-2004. 8-th International Conference Soled state physics, August 23-26, 2004, Almaty, Kazakhstan Abstracts Almaty-2004, pp. 254-255.
5. Бахадырханов М. К., Валиев С. А., Насриддинов С. С., Эгамов У. Особенности термических свойств сильнокомпенсированного Si<В,Мп>. РАН, Неорганические материалы, 2009, т. 45, №. 11, стр. 1291-1293.
6. Бараночкиков М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. Москва: Издательство «ДМК Пресс», 2012 г.