

Напряжение холостого хода в гетероструктуре оксид молибдена/кремний при облучении солнечным светом

И. Д. Самойлич

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

В данной работе представлены результаты расчетов напряжения холостого хода гетероструктуры оксид молибдена/кремний в условиях солнечного облучения. Установлены закономерности влияния на напряжение холостого хода разности работ выхода оксида молибдена и кремния, скорости поверхностной рекомбинации и тока короткого замыкания. Показано, что напряжение холостого хода существенно падает при росте скорости поверхностной рекомбинации свыше 10 м/с.

Ключевые слова: оксид молибдена, кремний, гетероструктура, солнечные элементы, поверхностная рекомбинация.

Оксиды переходных металлов (ОПМ) приобретают все большее значение для многих областей применения, начиная от тонкопленочных транзисторов и энергонезависимой памяти и заканчивая новыми контактными слоями в фотоэлектрических устройствах. Их высокая прозрачность делает их также интересными в качестве новых контактных слоев в фотоэлектрических устройствах. Благодаря настраиваемым (управляемым) электрическим свойствам и высокой прозрачности, они являются многообещающими кандидатами в качестве контактных слоев для создания эффективных кремниевых солнечных элементах [1]. В настоящее время гетеропереходы на основе ОПМ с использованием кремния в качестве поглощающего солнечное излучение материала уже приводят к эффективности солнечных элементов около 20-22%. Связано это с тем обстоятельством, что контакты ОПМ с кремнием способствуют эффективному пространственному разделению генерированные электронно-дырочных пар за счет их высокой работы выхода. Одной из важных не до конца решенных проблем солнечных элементов является разделение и извлечение носителей заряда через контактные слои. Механизмы разделения носителей заряда с помощью ОПМ, в частности оксида молибдена MoO_x , пока остаются недостаточно изученными. В этом плане моделирование токопереноса может быть использовано для получения информации о механизмах электронно-дырочных процессов в соответствующих гетеропереходах и тонких пленок ОПМ. Одной из проблем для контактов ОПМ в солнечных элементах считается выравнивание уровня энергии (Ферми) между отдельными слоями, что важно для формирования разделения дырок и электронов. Еще одной проблемой является отсутствие полной ясности в механизмах токопереноса внутри ОПМ, где дефекты и туннелирование с участием ловушек играет важную роль. На границе раздела MoO_x/Si для эффективного извлечения дырок из области генерации необходимо осуществить переходы дырок из валентной зоны Si в MoO_x . Для этого согласно [2] существуют два возможных пути их переноса. Первый – это межзонное туннелирование, при котором носители заряда напрямую туннелируют в зону проводимости MoO_x . Второй путь - туннелирование с участием ловушек, при котором носители заряда туннелируют через состояния ловушек в запрещенной зоне MoO_x . Эффективность разделения достигается за счет барьера Шоттки, когда электроны отталкиваются в объем кремния, а дырки прижимаются к границе MoO_x/Si . Это означает для дырочного контакта, что цель состоит в том, чтобы максимизировать проводимость дырок и минимизировать электронную проводимость. В работе с использованием разработанной модели токопереноса [3] проведены расчеты напряжения холостого хода V_{oc} для гетероструктуры MoO_x/Si при облучении солнечным светом в зависимости от скорости поверхностной рекомбинации S_p , работы выхода MoO_x F_m , тока короткого замыкания $J_{sc}=25,0-$

38,4 мА/см², рис.1. Концентрация доноров в кремнии $N_d=10^{15}$ см⁻³, электронное средство в кремнии 4,05 эВ, скорость S_p варьируется в пределах 0,1-100 м/с.

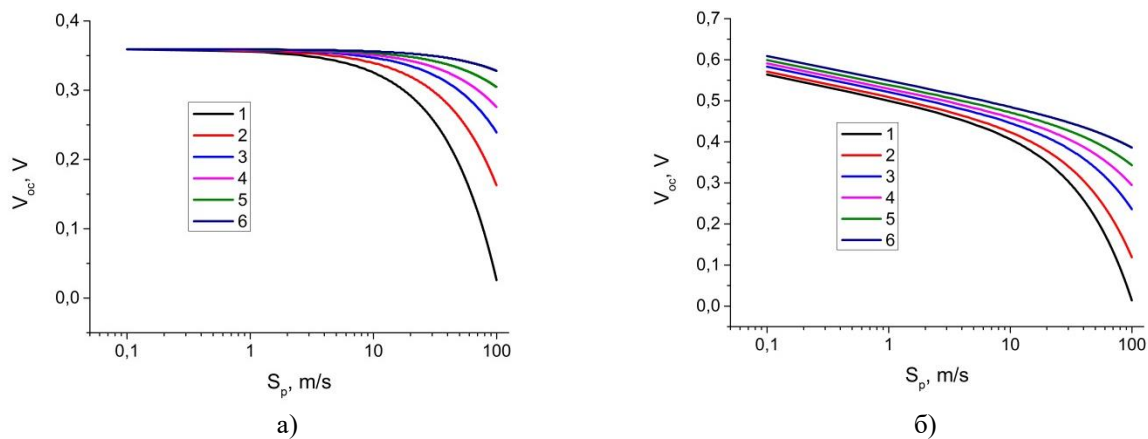


Рисунок 1 – Напряжение холостого хода V_{oc} гетероструктуры MoO_x/Si при $N_d=10^{15}$ см⁻³: $F_m=4.7$ эВ (а), $F_m=5.1$ эВ (б); $J_{sc}=37,6-38,4$ мА/см² (1), 37,0 мА/см² (2), 35,0 мА/см² (3), 33,0 мА/см² (4), 30,0 мА/см² (5), 25,0 мА/см² (6)

Для рассматриваемых параметров получено, что при низкой разнице работ выхода 0,65 эВ, рис.1а, напряжение V_{oc} составляет порядка 0,35 В и уменьшается с ростом скорости S_p и J_{sc} . Причем при $S_p < 5$ м/с и $F_m = 4,7$ эВ, V_{oc} практически не зависит от S_p , а при $S_p > 5$ м/с, V_{oc} снижается с ростом S_p и тем быстрее, чем больше ток J_{sc} , рис.1а. С ростом работы выхода, при разнице 0,85 эВ, V_{oc} достигает 0,55 В в области малых S_p , и при росте S_p , V_{oc} падает и тем быстрее, чем больше ток J_{sc} . При $F_m=5,1$ эВ наблюдается рост V_{oc} до примерно 0,6 В, и его падение с ростом S_p , рис.1б. Дальнейший рост работы выхода MoO_x до 5,3 эВ и выше не приводит к увеличению V_{oc} . Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При малой разности работ выхода MoO_x и Si получается относительно малая величина V_{oc} , что связано с наличием меньшего изгиба зон на поверхности кремния и соответственно меньшей величиной барьера Шоттки, меньшей напряженностью электрического поля на поверхности. При малых значениях скорости S_p , величина V_{oc} (0,36 В) немного меньше величины барьера Шоттки (0,385 В). С ростом разности работ выхода увеличивается V_{oc} – при $F_m=4,9$ эВ, $V_{oc}=0,55$ В, а барьер Шоттки равен 0,585 В. В этом случае увеличивается как равновесная концентрация дырок, так и напряженность поля на поверхности кремния. Однако рост $F_m=5,1$ эВ не приводит к существенному увеличению V_{oc} рис.1б. V_{oc} растет только до 0,6 В при малых S_p , т.е. всего на 0,25 В, тогда как высота барьера Шоттки увеличивается до 0,785 В. Таким образом, мы наблюдаем насыщение V_{oc} с ростом разности работ выхода MoO_x/Si . Проведенные расчеты показали, что напряжение холостого хода в гетероструктуре MoO_x/Si при малых скоростях поверхностной рекомбинации определяется в основном разностью работ выхода кремния и MoO_x , однако при росте скорости поверхностной рекомбинации его значение существенно снижается, что необходимо учитывать при разработке солнечных элементов на основе данной гетероструктуры.

Список источников

- [1] C. Battaglia, A. Cuevas, S. De Wolf. High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. Energy Environ. Sci. - 2016.– V.9.- P.1552—1576.
- [2] R. Garcia-Hernansanz, E. Garcia-Hemme, D. Montero. Transport mechanisms in silicon heterojunction solar cells with molybdenum oxide as a hole transport layer. Sol Energy Mater Sol Cells. – 2018. -V.185. – P.61-65.
- [3] A.L.Danilyuk, T.N.Sidorova, V.E.Borisenko, W.Hong, R.Rusli, C.Lu. An Enhanced Charge Carrier Separation in a Heterojunction Solar Sell with a Metal Oxide. Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science. 2022 - Vol. 219, Issue 1, 2100525 (8pp). DOI: 10.1002/pssa.202100525.