

ВЛИЯНИЕ МИКРОГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ КРЕМНИЙ–ГЕРМАНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ташкентский государственный технический университет,
ул. Университетская-2, г. Ташкент, 100095, Республика Узбекистан, mavlonov_g@mail.ru

Технологические методы изготовления и используемые полупроводниковые материалы для разработки эффективных солнечных элементов (СЭ) со стабильными параметрами и максимальным коэффициентом полезного действия (КПД) в настоящее время практически достигли своего предела. Для дальнейшего повышения основных параметров СЭ необходимо использовать принципиально новые полупроводниковые материалы или новые физические явления. В этом плане реальным способом повышения параметров СЭ является использование монокристаллических фотопреобразователей на основе внутренних гетеропереходов германий-кремний [1–8], которые открывают широкие возможности в конструировании наногетеросистем для приборов фотовольтаики нового поколения.

Для системы Ge/Si в Институте физики полупроводников СО РАН разработаны методы [6, 7] получения массивов квантовых точек Ge, распределенных на атомарно-чистой поверхности Si. Объединение плотного массива нанокластеров в объеме полупроводниковой матрицы квантовым транспортом носителей заряда в единую электронно-дырочную подсистему позволяет говорить о появлении нового класса полупроводников с промежуточной или отщепленной разрешенной зоной [8]. Теоретические оценки показывают, что при низкой себестоимости производства эффективность преобразования излучения в электричество для таких материалов может достигать 60%. Поэтому становится весьма актуальным исследование возможности синтеза материала с кластерами Ge в кремниевой матрице и изготовления СЭ на его основе.

Для исследований использовался монокристаллический кремний марки КЭФ, выращенный по методу Чохральского, с удельным сопротивлением от 0,5 до 1 Ом·см и концентрацией кислорода 10^{18} см⁻³. Диффузия германия проводилась по специально разработанной технологии низкотемпературной диффузии [9]. Содержание атомов германия и их распределение по глубине исследовались с помощью рентгеновского микрозондового анализа Jeol Super Probe JXA-8800 R/RL.

На рис. 1 представлено распределение атомов германия в приповерхностной области полученных образцов. Как видно из рисунка, до глубины 1 мкм на поверхности содержание атомов германия больше, чем атомов кремния, то есть получается варизонная структура на основе непрерывного твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ с $x > 0,5$, дальше содержание атомов германия резко снижается и при $d > 3$ мкм уменьшается настолько, что из-за ограниченности чувствительности прибора их содержание трудно определить. Управляя скоростью нагрева между этапами диффузии и выбирая параметры этапов в процессе диффузии, удастся получить твердый раствор $Si_{1-x}Ge_x$ с необходимой толщиной и составом. Таким образом, в кремнии можно получить варизонную структуру на основе непрерывного твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ со значением x от 0 до 1.

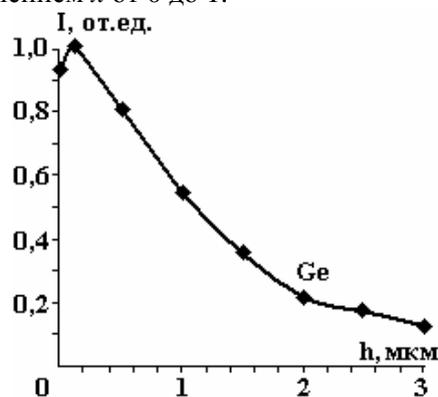


Рис. 1. Распределение атомов германия в приповерхностной области

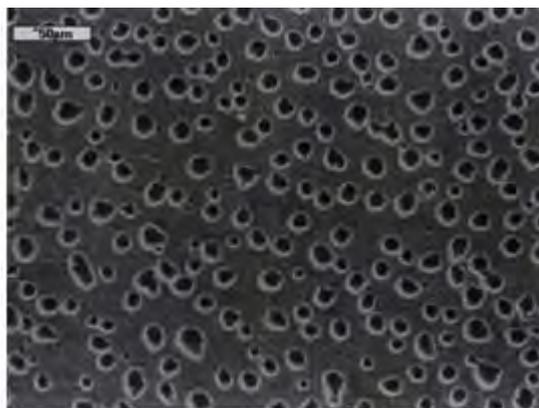


Рис. 2. Фотография приповерхностной области кремния, легированного Ge, после отжига при $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение трех часов

Установлено, что дополнительный отжиг полученных образцов при температурах $700\text{--}1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет образовывать микрогетеропереходы Si/SiGe/Si в решетке кремния. При этом существенную роль играют конкретная температура и время дополнительного термоотжига. Экспериментально установлено, что для образования микрогетеропереходов Si/SiGe/Si оптимальным является термоотжиг при температуре $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение трех часов. На рис. 2 представлено перераспределение атомов германия в приповерхностной области кремния, а также образование кластеров германия после дополнительного отжига при температуре $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты экспериментов показывают, что структурой, концентрацией и размерами кластеров атомов германия можно управлять как по поверхности, так и по толщине.

На основе полученного материала с микрогетеропереходами Si/SiGe/Si изготавливались СЭ, *p-n* переход которых формировался диффузией бора с использованием пластин нитрида бора. Глубина *p-n* перехода составляла $0,5\text{ }\mu\text{m}$. Токосъемные контакты создавались термическим напылением никеля через маску в вакууме, которые залуживались окунанием в припой ПОСК-50/18. В качестве просветляющего покрытия применялся слой SiO_2 толщиной 1000 \AA . Фотоэлементы изготавливались в виде параллелепипедов, имеющих размеры $(1,5 \times 2)\text{ см}$ при толщине $380\text{ }\mu\text{m}$.

Параметры изготовленных солнечных элементов

№ п/п	КПД солнечных элементов (%)		
	Контрольные солнечные элементы без Ge на основе Si <P>	Солнечные элементы на основе Si <P;Ge>	
		без Si/SiGe/Si микрогетеропереходов	с Si/SiGe/Si микрогетеропереходами ($3 \times 10^5\text{ см}^{-2}$ поверхностная плотность кластеров)
1.	16,1	16,9	18,6
2.	16,3	16,7	18,8
3.	15,9	16,8	18,7
4.	16,2	16,5	18,5
5.	16,2	16,9	18,9
6.	16,1	16,8	18,5

Для проведения измерений в одинаковых условиях использовался имитатор солнечного излучения, изготовленный на основе лампы накаливания с корректирующим фильтром. В таблице приведены параметры СЭ без атомов германия, параметры СЭ с атомами германия без образования кластеров и параметры СЭ с кластерами германия после дополнительного отжига в течение трех часов

при температуре 850°C, приводящего к образованию микрогетеропереходов Si/SiGe/Si в кристаллической решетке кремния. Измерение параметров СЭ проводилось при плотности мощности излучения 800 Вт/м² и температуре СЭ 20°C. Как видно из таблицы, эффективность работы СЭ с микрогетеропереходами SiGe на 2,5% выше параметров СЭ без германия, а также выше параметров солнечных элементов, содержащих германий, но не подвергнутых кластерообразующему отжигу в оптимальном режиме.

Увеличение эффективности работы СЭ обусловлено, с одной стороны, стабилизацией исходных параметров Si легированного Ge, а с другой стороны, поглощением микрогетеропереходами Si/SiGe/Si ИК спектра солнечного излучения. Также мы предполагаем, что вклад в фототок дают субзонные кванты, генерируемые отдельными связями Si-Ge вне кластеров. Данное утверждение подтверждается спектральной характеристикой изготовленных СЭ, на которой фоточувствительность СЭ с кластерами атомов германия смещается в сторону ИК области с энергией квантов 0,67 эВ.

В результате анализа полученных результатов исследования можно сделать вывод, что в материале Si<P,Ge>, содержащем кластеры германия, образуется структура с микрогетеропереходами Si/SiGe/Si, которая способна поглощать излучение солнечного спектра, начиная с энергии квантов 0,67 эВ. Полученные экспериментальные результаты показывают, что оптимальной является концентрация легирования кремния Ge 1,5·10²⁰ см⁻³ с последующим термоотжигом образцов при температуре 850°C в течение трех часов. В образцах с аналогичной концентрацией атомов германия, но не подвергнутых дополнительному термоотжигу такого эффекта не наблюдается. При концентрации легирования кремния Ge более 1,5·10²⁰ см⁻³ параметры солнечных элементов вне зависимости от температуры и времени дополнительного термоотжига резко ухудшаются и становятся невоспроизводимыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 444 с. 2005.
2. Hertmann G. Grimmeiss "Silicon-germanium – a promise into the future?" // ФТП, 33, 9, 1032–1034. (1999).
3. Помозов Ю.В., Соснин М.Г., Хируненко Л.И., Яшник В.И., Абросимов Н.В., В.Шрёдер, Хёне М. Кислородсодержащие радиационные дефекты в Si_{1-x}Ge_x // ФТП, 34, 9, 1030–1034. 2000.
4. Саидов А.С., Кутлимуратов А., Сапаев Б., Давлатов У.Т. Спектральные и вольт-амперные характеристики Si-Si_{1-x}Ge_x гетероструктур, полученных методом жидкофазной эпитаксии // Письма в ЖТФ, 27, 8, 26–35. 2001.
5. Антонова И.В., Соотс Р.А., Принц В.Я. Спектр электронных уровней и заселенность квантовых ям и квантовых точек в пассивированных гетероструктурах на основе Si и Ge // Сборник трудов VI международной конференции «Кремний – 2009», 7–10 июля 2009, Россия, Новосибирск.
6. Марков В.А., Пчеляков О.П., Соколов Л.В., Стенин С.И., Стоянов С. МЛЭ с синхронизацией зарождения. Поверхность, 4, 70–76 (1991).
7. Markov V.A., Pchelyakov O.P., Sokolov L.V., Stenin S.I., Stoyanov S.S. Molecular beam epitaxy with synchronization of nucleation. Surface Science, 250, 1-3, 229–234, (1991).
8. Пчеляков О.П., Никифоров А.И., Паханов Н.А., Чикичев С.И., Якимов А.И. Перспективные наногетероструктуры на кремнии для фотовольтаики // Сборник трудов VI международной конференции «Кремний – 2009», 10 июля 2009, Россия, Новосибирск.
9. Абдурахманов Б.А., Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Насриддинов С.С. О диффузии атомов германия в кремний // ДАН РУз. № 1. 2008. С. 18–20.

Поступила 04.05.10

Summary

It is established, that annealing at 850 °C the monocrystal silicon doped with germanium, reduce to the formation internal microheterojunctions Si/SiGe/Si, which enhancement of efficiency to 2,5 % of solar cells made on its basis.