ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ЭДС И НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНОЧНЫХ КРЕМНИЕВЫХ p-n-СТРУКТУРАХ

Ш.К. Кучканов[1), 2)], Х.Б. Ашуров[1)], Б.М. Абдурахманов[1)], М.М. Адилов[1)], С.Е. Максимов[1)], Ш. Махмудов[3)], А.И. Камардин[4)]
[1)]*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова Академии Наук Республики Узбекистан, ул. Дормон йўли 33, Ташкент 100125, Узбекистан, Sher.kurbonov@inbox.ru, ashurov@iplt.uz, bogarab@mail.ru, muxammad.84@mail.ru, maksimov_s@yahoo.com*
[2)]*Институт материаловедения Академии Наук Республики Узбекистан, ул. Г. Мавлянова 2 Б, Ташкент 700084, Узбекистан, Sher.kurbonov@inbox.ru*
[3)]*Институт ядерной физики Академии Наук Республики Узбекистан, п. Улугбек, ул. Хуросон 1, Ташкент 100214, Узбекистан, makhmudov@inp.uz*
[4)]*НТЦ с КБ и ОП Академии Наук Республики Узбекистан, ул. Дормон йўли 33, Ташкент 100125, Узбекистан, kadmon@bk.ru*

Приведены результаты исследований влияния ионной обработки и облучения тепловыми нейтронами эпитаксиальных плёночных кремниевых p-n-структур на генерацию в них при нагреве ЭДС и носителей заряда. Показано, что эффект более стабилен в случае нейтронного облучения. Сделан вывод о перспективности применения радиационной обработки полупроводниковых структур для разработки преобразователей тепловой энергии.

Ключевые слова: тепловольтаический эффект; кремний; ионные пучки; тепловые нейтроны; плёночные p-n-структуры; преобразователи тепловой энергии.

INFLUENCE OF NEUTRON IRRADIATION AND ION TREATMENT ON THE GENERATION OF EMF AND CHARGE CARRIERS IN EPITAXIAL SILICON FILM p-n-STRUCTURES

Sh.K. Kuchkanov[1), 2)], Kh.B. Ashurov[1)], B.M. Abdurakhmanov[1)], M.M. Adilov[1)], S.E. Maksimov[1)], Sh. Makhmudov[3)], A.I. Kamardin[4)]
[1)]*Arifov Institute of ion plasma and laser technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 33 Dormon Yuli Str., 100125 Tashkent, Uzbekistan, ashurov@iplt.uz,Sher.kurbonov@inbox.ru, bogarab@mail.ru, muxammad.84@mail.ru, maksimov_s@yahoo.com*
[2)]*Institute for Material Sciencies of Academy of Sciencies of the Republic of Uzbekistan, 2B G. Mavlyanov Str., 700084 Tashkent, Uzbekistan, Sher.kurbonov@inbox.ru*
[3)]*Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 1 Khuroson Str., 100214 Ulugbek village, Tashkent, Uzbekistan, makhmudov@inp.uz*
[4)]*Scientific and technical center with Design bureau and Experimental production, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 33 DurmonYuli Str., 100125 Tashkent, Uzbekistan, kadmon@bk.ru*

The results of studies of the effect of ion treatment and irradiation with thermal neutrons of epitaxial silicon film p-n structures on generation in them during heating of the emf and charge carriers are presented. It is shown that the effect is more stable in the case of neutron irradiation. A conclusion is made about the prospects of using radiation treatment of semiconductor structures for the development of thermal energy converters.

Keywords: thermovoltaic effect; silicon; ion beams; thermal neutrons; film p-n structures; thermal energy converters.

Введение

Создание эффективных возобновляемых источников энергии на основе кремния является в настоящее время одним из основных направлений разработок в области альтернативной энергетики. С точки зрения преобразования в электроэнергию тепловой составляющей солнечного излучения, а также тепла от различных источников большой интерес представляет обнаруженный в кремнии и других полупроводниках процесс генерации при их нагреве ЭДС и носителей заряда, называемый тепловольтаический эффект (ТВЭ) [1]. Экспериментально ТВЭ наблюдался у широкого круга кремниевых объектов [2-4]. Исследования [2-4] показали, что величина ТВЭ зависит от концентрации дефектов в материале, и результаты объяснялись в соответствии с [5] генерацией носителей заряда за счет поглощения субзонных фотонов с участием глубоких энергетических уровней, обусловленных дефектами структуры, а также наличием различных примесей. Согласно [5] необходимым условием проявления ТВЭ является наличие критической концентрации глубоких уровней более $4\cdot10^{18}$см$^{-3}$. При облучении γ-квантами ^{60}Co с дозой 10^9 рад плёночных p-n-структур Si/Si [6] и Si-Ge:Ti/Si [7], а также при обработке их поверхностей пучками ионов He^+ с энергией 4 кэВ до доз 10^{16}-10^{17} см$^{-2}$ [8] показано, что ответственными за генерацию носителей заряда являются именно дефекты собственной структуры. Однако, несмотря на изученность дефектов в кремнии и на его поверхности [9], остаётся неясным, какие именно их уровни могут быть ответственны за возникновение ТВЭ, а также возможная пространственная локализация данных дефектов.

Результаты и их обсуждение

С практической точки зрения, важной является оценка возможностей использования для создания относительно недорогих плёночных преобразователей тепла в электричество на основе различных полупроводниковых материалов, включая кремний, современных радиационных технологий. В этой связи, представляет интерес изучение влияния нейтронной обработки на процессы генерации ЭДС и носителей заряда в полупроводниковых плёночных p-n структурах.

Исследования влияния нейтронного облучения на ТВЭ были проведены на стандартных эпитаксиальных кремний-кремниевых плёночных p-n-структурах, которые были получены в условиях, заведомо исключающих попадание неконтролируемых примесей, в особенности тех, которые могли бы дать глубокие энергетические уровни. Перед проведением облучения были измерены токи и напряжения, генерируемые при нагреве этих структур в диапазоне температур 300-900 К. Исследования проводились по методике [6, 7, 10] при размещении макроскопических титановых контактов на свободной поверхности плёнки Si-Ge:Ti и на тыльной стороне Si подложки, со стороны которой осуществлялся нагрев. Затем было проведено облучение данных структур тепловыми нейтронами в течение 600 с до набора дозы $4\cdot10^{16}$ см$^{-2}$, что близко значениям доз [8] облучения ионами He^+. После проведения облучения параметры этих плёнок измерены в указанном температурном диапазоне спустя 38 дней.

Обнаружено, что облучение нейтронами существенно влияет на величину возникающих при нагреве тока короткого замыкания и напряжения, а также на сопротивление структур. Анализируя полученные результаты, необходимо отметить следующие основные особенности.

1) Облучение нейтронами, как и облучение γ-квантами ^{60}Co [6, 7] и ионная обработка поверхности [8], приводит к усилению генерации токов при нагреве.

2) Нейтронной облучение приводит к генерации в плёночных структурах ЭДС, что при γ-облучении и ионной обработке практически не наблюдалось.

3) Повторные измерения, а также проведённые на тех же образцах спустя 30

дней после первых, показали, что величины генерируемых ЭДС и токов практически не изменялись (рис. 1), тогда как у образцов, подвергнутых γ-облучению и ионной обработке, значения плотностей токов после прогрева в указанном выше диапазоне температур возвращались к первоначальным, т.е. имел место термический отжиг наведённых дефектов.

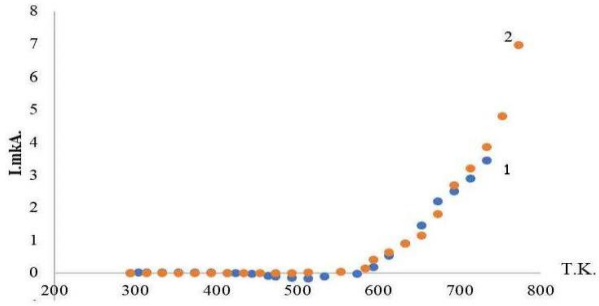

Рис. 1. Генерация при нагреве носителей в эпитакиальных плёночных кремниевых p-n-структурах (плёнка n-типа на подложке КДБ-10): 1 – через 38 дней после облучения, 2 – повторное измерение через 30 дней

Полученные результаты свидетельствуют, что дефекты структуры являются ответственными за генерацию в полупроводниках при нагреве не только носителей заряда, но и ЭДС, т.е. играют основную роль в возникновении тепловольтаического эффекта в объектах различного типа.

Заключение

Конкретные типы дефектов, приводящие к появлению напряжений и токов, могут быть различны при облучении ионами гелия и тепловыми нейтронами. В связи с этим представляет интерес обработка структур такого типа пучками ионов с близкими массами, но различающимися по своим свойствам в качестве примесных атомов. С практической точки зрения, полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения радиационных технологий для создания на основе полупроводниковых материалов эффективных преобразователей в электричество инфракрасной составляющей солнечного излучения и тепла от различных источников.

Библиографические ссылки

1. Саидов М.С. Особенности и перспективы использования примесного тепловольтаического эффекта полупроводниковых структур. *Гелиотехника* 2007; (4): 3-7.
2. Саидов М.С., Абдурахманов Б.М., Олимов Л.О. Примесный тепловольтаический эффект границ зерен поликристаллического кремниевого солнечного элемента. *Гелиотехника* 2007; (4): 8-14.
3. Kurbanov M.Sh., Abdurakhmanov B.M., Ashurov Kh.B. Prospects for the development of silicon production and solar energy products in the Republic of Uzbekistan. *Applied Solar Energy* 2018; 54(2): 85-90.
4. Саидов А.С., Абакумов А.А., Саидов М.С., Усмонов Ш.Н., Холиков К.Т. Тепловольтаические свойства солнечно-плавленого технического кремния. *Гелиотехника* 2007; (4): 102-104.
5. Саидов М.С. Возможные полупроводниковые непрерывные твердые растворы для термофотоэлектрических элементов. *Гелиотехника* 1999; (3): 52-58.
6. Абдурахманов Б.М., Ашуров М.Х., Ашуров Х.Б., Кучканов Ш.К., Максимов С.Е., Ниматов С.Ж. Дефекты и тепловольтаический эффект в плёночных кремниевых p-n структурах, полученных вакуумным осаждением. *Узбекский физический журнал* 2014; 16(3): 219-224.
7. Кучканов Ш.К., Ашуров Х.Б., Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Максимов С.Е., Ниматов С.Ж. Дефекты структуры и тепловольтаический эффект в плёнках Si-Ge:Ti/Si, полученных газофазной эпитаксией. Восьмая Международная конференция по Физической Электронике IPEC-8. 23-24 сентября, 2021. Ташкент, Узбекистан. Сборник тезисов докладов. С.112-113.
8. Kuchkanov Sh.K., Adilov M.M., Kamardin A.I., Maksimov S.E., Khojiev Sh.T., Ashurov Kh.B. Thermal voltaic effect in Si-Ge/Si and Si-Ge/Si film structures subjected to ion treatment. *Applied Solar Energy* 2022; 58(3): 355-359.
9. Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. Москва: Наука; 1990. 260 с.
10. Кучканов Ш.К., Ашуров Х.Б. Генерация носителей заряда в пленках кремний-германий, сильно легированных титаном, при их однородном нагреве. *Письма в ЖТФ* 2018; 44(8): 42-48.