



ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ИЗОВАЛЕНТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Тошев Алишер Рахматуллаевич

Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета E-mail address: toshev.ali0550@gmail.com

Аннотация: В данной работе исследуется влияние концентрированного солнечного излучения на характеристики кремниевых солнечных элементов, легированных изовалентными примесями. Основное внимание уделяется изменениям в фотоэлектрических параметрах элементов под действием высокой плотности солнечной энергии, включая возможные процессы термической деградации и восстановления. Рассматриваются типы изовалентных примесей, таких как германий и углерод, и их роль в формировании дефектной структуры и в повышении термической стабильности кремниевой решётки. С использованием численного моделирования и экспериментальных данных проводится анализ устойчивости солнечных элементов при длительном воздействии концентрированного излучения. Результаты исследования могут быть применены при разработке более эффективных и долговечных фотоэлектрических систем для эксплуатации в экстремальных климатических условиях.

Ключевые слова: с концентрированное солнечное излучение, кремниевые солнечные элементы, изовалентные примеси, фотоэлектрические свойства, деградация, термическое воздействие, эффективность преобразования энергии, полупроводниковые материалы, устойчивость, модификация кремния.

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматриваются результаты исследований влияния концентрированного солнечного излучения на кремниевые солнечные элементы с изовалентными примесями. Целью исследования является определение изменений электрических параметров СЭ с введенными ИВП под воздействием КСИ и разработка рекомендаций по оптимизации их эффективности

Солнечная энергия занимает особое место среди возобновляемых источников энергии, и технологии производства электроэнергии с ее использованием быстро развиваются. Солнечные элементы (СЭ) играют важную роль в этом отношении, и расширение возможностей использования солнечной энергии становится возможным за счет повышения их эффективности. Кремниевые (Si) СЭ в настоящее время являются наиболее распространенными, отличаясь относительно низкой стоимостью и хорошей технологической освоенностью. Однако для дальнейшего повышения эффективности СЭ на



основе кремния применяются различные методы. Одним из них является введение изовалентных примесей (ИВП). Изовалентные примеси - это элементы, валентность которых равна валентности основного материала (кремния) (например, углерод, германий и др.). Их введение позволяет снизить количество дефектов в кристаллической решетке и улучшить параметры СЭ. В то же время, концентрирование солнечного излучения (направление, усиление) также является одним из перспективных способов повышения эффективности СЭ. Работа СЭ под воздействием концентрированного солнечного излучения (КСИ) зависит от ряда факторов, включая повышение температуры и высокие токи фотогенерации [1-4]. Поэтому изучение влияния КСИ на СЭ на основе кремния с введенными ИВП имеет важное значение. В данной статье рассматриваются результаты исследований влияния концентрированного солнечного излучения на кремниевые солнечные элементы с изовалентными примесями. Целью исследования является определение изменений электрических параметров СЭ с введенными ИВП под воздействием КСИ и разработка рекомендаций по оптимизации их эффективности

Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения (КСИ) является одним из наиболее перспективных путей снижения удельной стоимости получаемой фотоэлектрической энергии [5-7]. Это обусловлено снижением требуемой площади дорогостоящих солнечных элементов на 1 Вт вырабатываемой мощности пропорционально кратности КСИ.

При преобразовании КСИ рабочая температура СЭ поднимается существенно более высоких температур в зависимости от кратности КСИ и условий теплоотвода. В естественных условиях с увеличением кратности солнечного излучения температура растет, причем рост зависит от конструкции элементов и вида теплоотвода. Большой научный и практический интерес представляет исследование зависимости характеристик СЭ от интенсивности падающего света и температуры, возникающей за счет солнечного излучения, выбор оптимального значения КСИ для получения максимальной выходной мощности и КПД в единицы площади элементов, а также возникающей нестабильности выходных характеристик при длительной эксплуатации в натуральных условиях. Если не предусмотрено охлаждение, то рабочая температура солнечных элементов повышается, что влияет на концентрацию носителей заряда, а также на процесс поглощения света и обуславливает изменение выходных параметров СЭ.

Для проведения исследований изготавливались СЭ с использованием технологии описанной в работе [8-9]. Для снижения контактного сопротивления омических контактов использовались изотипные $p-p^+$, $n-n^+$ переходы. Технология получения изотипных $p-p^+$, $n-n^+$ переходов аналогична технологии формирования $p-n$ перехода. Особенностью проведения процесса диффузии в данном случае является легирование акцепторной примесью кремниевых



подложек р-типа, и донорной примесью подложек n-типа. Получаемый профиль легирования при формировании изотипных р-р⁺, n-n⁺ переходов аналогичен профилю концентрационного распределения примеси при получении р-n перехода. Концентрация примеси в n⁺ и р⁺ слоях достигала предельной растворимости бора и фосфора соответственно, и имела значения более $>10^{20}$ см⁻³. Высокая степень легирования необходима для получения малого контактного сопротивления. При концентрации легирования более $>10^{18}$ см⁻³ удельное контактное сопротивление определяется в основном туннельными процессами и быстро уменьшается по мере повышения степени легирования. Температура получения оптимально изотипного перехода был равен $T=1100$ °С, при этом глубина залегания изотипного перехода составляла от 0.3 до 10 мкм.

Измерения ВАХ СЭ производились на установке, которая была описана выше. Концентрация излучения получалась фокусировкой, отраженной от параболического концентратора солнечного излучения на поверхность СЭ. Каждый СЭ был припаян к охлаждаемому подложку при помощи проточной воды медному термостатированному корпусу. При исследованиях фотоэлектрических характеристик солнечных элементов в зависимости от падающего света, температура СЭ за счет водяного охлаждения поддерживалась постоянной, или росла под действием концентрированного излучения в диапазоне $T=35-130$ °С и контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термопары.

Результаты измерений тока короткого замыкания и вырабатываемой мощности СЭ при различных концентрациях солнечного излучения показаны на рис.-1 и -2. При 100-кратном солнечном излучении температура, с помощью водяного охлаждения, поддерживалась на уровне ~ 70 °С. СЭ при таких условиях находились в течении $t=1000$ часов.

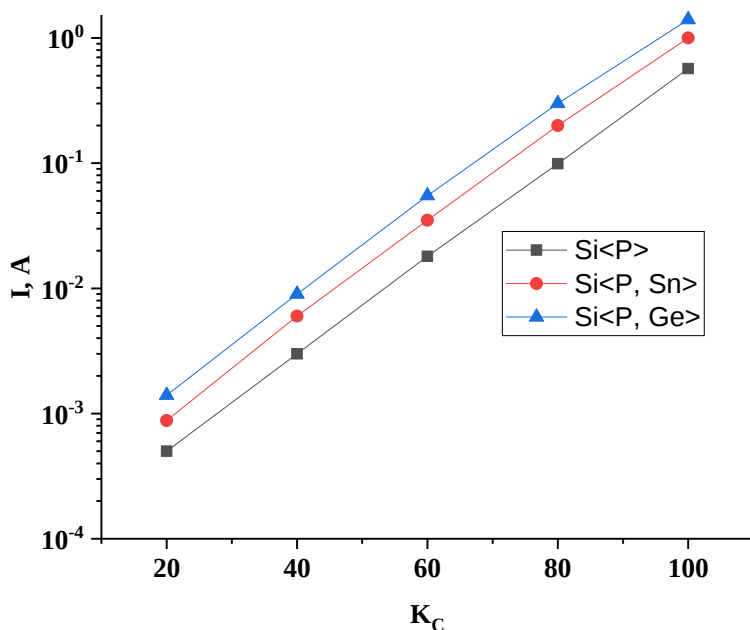




Рис.-1. Зависимость тока короткого замыкания СЭ от концентрированного солнечного излучения. 1-СЭ на основе Si<P>; 2-СЭ на основе Si<P, Sn>; 3-СЭ на основе Si<P, Ge>.

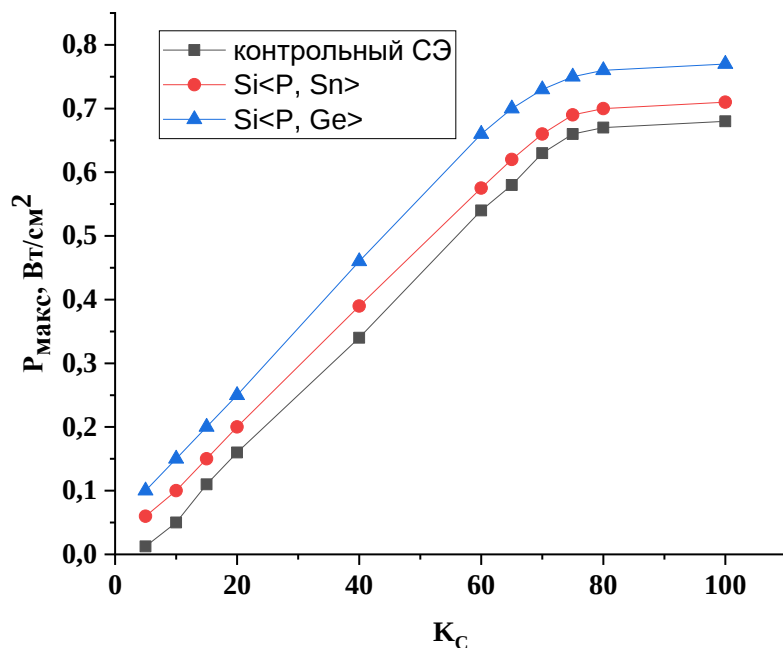


Рис.-2. Зависимость максимальной выходной мощности солнечных элементов от концентрированного солнечного излучения.

1- контрольный СЭ; 2- Si<P, Sn>; 3- Si<P, Ge>.

Как видно из приведенных кривых, коэффициент концентрации существенно влияет на величину тока короткого замыкания и соответственно влияет на вырабатываемую мощность СЭ. Однако абсолютное увеличение тока короткого замыкания при соответствующем увеличении коэффициента концентрированного солнечного излучения сопровождается уменьшением коэффициента заполнения ВАХ из-за увеличения рекомбинации неосновных носителей заряда.

Как видно из зависимости на рис. -2, наблюдается существенный прирост выходной электрической мощности до величины $K_c=80$ крат, далее наступает насыщение и дальнейшее увеличение дает очень незначительный прирост вырабатываемой мощности. Такая же закономерность наблюдается для зависимости $I_{к.з.}$ от K_c , рис.-1. Здесь также наблюдается уменьшение скорости нарастания $I_{к.з.}$ с уровня $K_c=80$ крат, однако изменение $I_{к.з.}$ менее выражено по сравнению с изменением выходной мощности, что связано с сильным влиянием напряжения холостого хода на выходную мощность.

Последующие измерения параметров СЭ на имитаторе солнечного излучения показали, что в СЭ без изовалентных примесей $I_{к.з.}$ и U_{xx} уменьшились соответственно на 18 % и 5 %, тогда как в СЭ с изовалентными примесями (Sn, Ge) практически не изменились исходные параметры.



ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Андреев, В.М. Концентраторные солнечные модули с высокой эффективностью в широком диапазоне рабочих температур / В.М. Андреев, Н.Ю. Давидюк, В.С. Калиновский и др // В сборнике: Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность, 2016 Материалы Международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность». - 2016. - С. 91-96.
2. Al Husna, H.; Ota, Y.; Minemoto, T.; Nishioka, K. Field test analysis of concentrator photovoltaic system focusing on average photon energy and temperature. Jpn. J. Appl. Phys. 2015, 54, 08KE05.
3. Юлдошев И.А. Повышение эффективности фотоэлектрической батареи принудительным охлаждением // Проблемы энергоресурсосбережения. – Ташкент, 2015. – № 3. – С. 122-127.
4. Michael E., Mc. Eachen, Patrick Haynes, Christopher Peterson Wyatt Rodgers, Jim Spink, Mike Eskenazi Mark O'Neill and Paul Sharps. Point-Focus Concentration Compact Telescoping Array EESP Option 1 Phase Final Report for Public Release// NASA STI Program Mail Stop 148 NASA Langley Research Center Hampton, VA 23681-2199.
5. Майоров В.А., Стребков Д.С., Трушевский С.Н. Исследование конструктивных и энергетических параметров приемников излучения солнечных модулей с концентраторами// Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» научно-технический центр «ТАТА», №6 (170), 2015 г.
6. Mohammed Kh.Kh. High Efficiency Tandem Solar Cell based on InGaP and GaAs for Sustainable Energy Applications// International Journal of Computer Applications, Volume 181 – No. 18, 2018y.
7. Y. Chen et al., "Mass production of industrial tunnel oxide passivated contacts (i-TOPCon) silicon solar cells with average efficiency over 23% and modules over 345 W," Prog Photovolt Res Appl, 2019.
8. Ayupov K.S., Bobonov D.T., Zikrillaev N.F., Saparniyazova Z.M., Toshev A. low-temperature diffusion of impurities in silicon // Doklady AN Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. - Tashkent, 2010. - No. 4.– S. 34- 38.
9. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Тошев А.Р., Саидов М.С. «Влияние изовалентных примесей на параметры кремниевых солнечных элементов», Гелиотехника 2001 г., №4, стр. 13-18.