

УДК 621.315.592

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СОЗДАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ

Небеснюк О.Ю., Никонова А.А., Хрипко С.Л., Никонова З.А.

PERSPECTIVE DIRECTIONS OF PHOTOELECTRIC TRANSFORMES AND CREATION OF QUALITY CONTACT SYSTEMS

Nebesniuk O.Y., Nikonova A.A., Khripko S.L., Nikonova Z.A.

Солнечные элементы являются ключевым фактором современной энергетики и находятся в центре экономических, социальных и экологических целей мирового развития. Объем производства солнечных фотоэлектрических систем возрастает в среднем на 30% в год. Улучшение качества, использование новых полупроводниковых материалов и способов металлизации позволило разработать ряд новых электронных приборов. Большие возможности открывает использование эпитаксиальных композиций для изготовления фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). В статье предложены перспективные направления повышения эффективности ФЭП на эпитаксиальных структурах, новая технология создания контактных систем (КС) для ФЭП и проведено исследование их стабильности. При этом формировались очень высокие требования к электрофизическим свойствам исходных материалов.

Ключевые слова: кремний, эпитаксиальные композиции, контактные системы, пластина, фотоэлектрические преобразователи

Введение. Целесообразность преобразования солнечной энергии в электрическую уже сейчас не вызывает сомнения. Однако высокая стоимость исходных материалов, невысокий коэффициент полезного действия, зависимость работы от интенсивности световой энергии являются серьезными препятствиями для использования солнечных батарей.

Причинной снижения их эффективности являются потери на отражение, неполное поглощение квантов света, частичное использование энергии фотонов, рекомбинация генерированных носителей заряда, не оптимальное соотношение между напряжением холостого хода и током короткого замыкания, величина последовательного сопротивления, не соответствие нагрузки оптимальной величине. Однако существует ряд направлений, позволяющих снизить стоимость

энергетических установок по преобразованию солнечной энергии в электрическую. Одна из них – разработка новых технологий и использование дешевого материала.

Целью работы является исследование по разработке технологии создания ФЭП на основе недорогих исходных полупроводниковых материалов и создание для них качественных контактных систем.

Изложение основного материала. Как известно [1,2,3], преобразование солнечного излучения непосредственно в электрическую энергию осуществляется с помощью фотоэлектрических преобразователей. Актуальной задачей их создания является повышение КПД, снижение стоимости вырабатываемой энергии, повышение стойкости к спецвоздействиям.

Среди различных полупроводниковых материалов, пригодных для изготовления ФЭП, наиболее перспективным является кремний [4,5,6]. Он имеет ширину запрещенной зоны ($E_d = 1,12$ эВ), близкую к оптимальной, достаточную подвижность носителей заряда $\mu_n = 1450$, $\mu_p = 500$ см²/В·с, хорошо адсорбирует энергию. Технология его получения хорошо освоена для нужд полупроводниковой электроники, а сырьевая база его достаточно обеспечена.

Установлено, что уменьшение интенсивности освещения кремния в ФЭП резко уменьшает значение короткого замыкания. В значительно меньшей степени уменьшается напряжение.

Для эффективного преобразования солнечного излучения в электрическую энергию за счет разделения генерируемых электронно – дырочных пар внутренним электрическим полем необходимо, чтобы глубина залегания разделяющего поля была

достаточной для проникновения основного потока фотонов. В кремнии солнечная энергия адсорбируется в слое толщиной $\sim 0,00254$ мкм [7, 8].

Как известно, [9, 10] наибольшая эффективность ФЭП наблюдается в диапазоне длин волн от 0,6 до 8 мкм, т.е. находится на границе видимого и инфракрасного излучений. Смещение в область коротких волн увеличивает эффективность преобразования энергии. Однако в реальных условиях необходимо работать в области ближе к инфракрасной т.е. в области более длинных волн. Это объясняется тем, что атмосфера более прозрачная для них. Для этого необходимо увеличивать глубину залегания внутреннего поля. При длине волны меньше 1,1 мкм ФЭП не чувствительны к потоку фотонов, т.к. их энергия недостаточна для генерации носителей заряда.

Повышает эффективность преобразования и нанесение дополнительного просветляющего покрытия на рабочую поверхность ФЭП, из-за снижения потерь на отражение.

Среди известных конструкций ФЭП [11,12] особенного внимания заслуживают элементы со структурой полупроводник – диэлектрик – полупроводник (ПДП). Они выгодно отличаются простотой технологических процессов, применением низкотемпературных процессов, отсутствием “мертвого” поверхностного слоя, усилением отклика в коротковолновом диапазоне, возможностью сохранения жизни носителей заряда исходного полупроводникового материала, высокой производительностью процесса и сильнолегированного полупроводника без заметного ухудшения прохождения света через него, повышенной радиационной стойкостью.

В основе таких ФЭП лежат гетеропереходы, образованные двумя полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны. Напряжение на фотоэлементе определяется меньшей из запрещенных зон. Ток короткого замыкания определяется фотонами с энергией $E_{g_2} - E_{g_1}$, а напряжение холостого хода значением несколько меньшим ширины запрещенной зоны полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны.

При $E_{g_2} < h\nu < E_{g_1}$ фотон проходит через первый полупроводник и поглощается вторым. Генерированные им носители заряда в обедненном слое и в пределах диффузионной длины от перехода будут разделены. Принципиальное преимущество ФЭП с гетеропереходом определяется возможностью уменьшения потерь за счет поверхностной рекомбинации и уменьшения сопротивления поверхностного слоя. Эти потенциальные возможности можно реализовать путем выбора оптимальной геометрии ФЭП и решением ряда технологических проблем.

Авторы считают, что применение широкозонного полупроводника в ПДП структуре ФЭП в виде тонкой пленки повысят его чувствительность в голубой и фиолетовой частях солнечного спектра. Благодаря этому уменьшатся потери носителей заряда, повысится напряжение холостого хода, увеличится время жизни носителей заряда, коэффициент заполнения, радиационная стойкость, расширится диапазон спектральной чувствительности.

Величина фототока в гетеропереходах описывается выражением аналогичным для гомопереходов, а в обедненном слое [13]:

$$I_{\alpha_2} = gF(1 - R) \left[e^{-\alpha_1 x_j} \{ 1 - e^{-\alpha_1 w_2} \} + e^{-\alpha_1 (w_1 + x_j)} \{ 1 - e^{-\alpha_2 w_2} \} \right]$$

где α_1, α_2 – коэффициенты поглощения соответственно в первом и втором полупроводниках;

x_j – глубина залегания обедненного слоя;

F – плотность фотонов;

R – коэффициент отражения.

В экспериментальных ПДП – структурах верхним слоем являлся широкозонный тонкопленочный полупроводник, который отдален от полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны тонким слоем диэлектрика. При этом широкозонный полупроводник имел хорошую оптическую прозрачность, а нижний – такую ширину запрещенной зоны, которая обеспечила максимальное поглощение солнечного спектра. Слой диэлектрика между полупроводниками должен быть очень тонким и составлять 1-3 нм. Он является одним из важных параметров, определяющих мощность ФЭП.

Экспериментально подтверждено, что наличие промежуточного слоя диэлектрика на границе гетероперехода приводит к возрастанию напряжения холостого хода а, следовательно, к улучшению характеристик ФЭП.

Одним из направлений повышения эффективности является разработка улучшенной технологии получения основных элементов для батарей наземного применения, которая включает подготовку подложек и исходных компонентов, создание ФЭП, контактных систем и токосъемных сеток к ним, разделение полученных образцов на отдельные элементы.

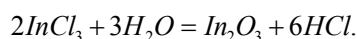
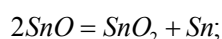
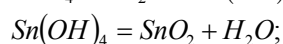
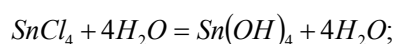
Сочетание двух полупроводников с различной шириной запрещенных зон, позволило создать структуру:



т.е гетеропереход - оксидный полупроводник – полупроводник.

In_2O_3 имеет $E_g = 5$ эВ и электронное сродство $\alpha = 4,45$ эВ, а SnO_2 , $E_g = 3,5$ эВ и $\alpha = 4,8$ эВ. Смесь In_2O_3 и SnO_2 , так называемая ИТО – смесь имеет $E_g = 3,7$ эВ и $\alpha = 4,2 - 4,5$ эВ. Тонкие пленки состава $SnO_2 + In_2O_3$ сочетают высокую прозрачность с хорошей проводимостью.

Такая гетероструктура была создана путем нанесения тонкого слоя ИТО – смеси на специально подготовленную поверхность пластин кремния. При этом на нагретой поверхности кремниевой пластины протекали химические процессы, которые можно описать следующими уравнениями:



Осажденные таким образом на поверхности пластины кремния оксиды олова и индия формируют барьерный слой, создают хорошую проводимость его и оказывают просветляющее действие поверхности, снижают процессы поверхностной рекомбинации, а большая ширина запрещенной зоны металла создает “окна” в гетеропереходе.

Полученные пленки не являются стехиометрическими. В SnO_2 и In_2O_3 вакансии кислорода носят донорный характер, поэтому полученные пленки обладают достаточно высокой электропроводностью. Её можно повысить и путем введения донорной примеси.

Проводимость пленки SnO_2/In_2O_3 определялась состоянием олова в кристаллической решетке оксида индия. При небольших концентрациях атомы олова замещают атомы индия, в результате, в кристаллической решетке триоксида индия, олово выступает в качестве донора. Однако при больших концентрациях создаются условия образования из комплексов нейтральных молекул $(SnO_2)_2$. При этом, донорные атомы олова переходят в нейтральные комплексы, концентрация свободных носителей заряда уменьшается, проводимость падает. Как известно [7], наибольшая проводимость пленки оксида олова и индия получается при мольной концентрации индия к олову 97:3.

В ходе эксперимента установлено так же, что при создании гетеропереходов важную роль играет температура подложки. Достаточно быстрый рост оксидной пленки олова и индия на поверхности полупроводниковой кремниевой подложки наблюдается при высокой температуре ($>550^\circ\text{C}$). Однако при этом возрастает последовательное сопротивление структуры, что приводит к

подавлению генерированного фототока. При низких температурах ($<360^\circ\text{C}$) – аморфные образования и ускоренный рост отдельных зародышей. Это так же неблагоприятно сказывается на параметрах ФЭП и вызывает уменьшение холостого хода.

Выбор оптимальных соотношений мольных концентраций индия и олова и температуры кремниевой подложки при создании гетероперехода позволило получить проводимость равную $5 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, что объясняется эффектом многоступенчатого туннелирования, влиянием туннельно – тонкого слоя диэлектрика, рекомбинацией в области пространственного заряда.

Полученная ИТО – смесь, как оксидный полупроводник, имеет свойства близкие к металлам, обладает хорошей прозрачностью, высокой стабильностью, подавляет эффект туннелирования основных носителей, надежно защищает поверхность полупроводника от внешних воздействий.

Достаточно тонкий слой диэлектрика (1 – 2 нм) между полупроводниками структуры определяет величину тока туннелирования, которая намного больше тока носителей, образующихся с помощью термических процессов в объеме базового полупроводника, “неравновесные” процессы в структуре смещают квазиуровень Ферми к краю зоны проводимости. Это позволяет рассматривать структуру как p – n переход.

Авторы считают, что одним из направлений повышения эффективности ФЭП – и качества контактных систем – это создание в структуре высоколегированной области со стороны тыльного контакта. Возникающий при этом между двумя однотипными базовыми областями потенциальный барьер величиной $g\phi$ препятствуют выходу неосновных носителей тока из базовой области, концентрация легирующей примеси в которой меньше. Такая структура эквивалентна ФЭП, но имеет меньшую скорость поверхностной рекомбинации вблизи тыльной поверхности. Это приводит к увеличению спектрального отклика для фотонов с малой энергией. При пониженных концентрациях легирующей примеси в приповерхностном слое и малой глубине залегания барьерного перехода возрастает спектральный отклик для фотонов с большей энергией.

Кроме того, в таких элементах, получивших название “фиолетовых”, устраняется так называемый “мертвый” поверхностный слой и возрастает время жизни носителей тока.

Интерес к исследованиям высоколегированных слоев на основе кремния в последнее время стимулируется развитием микро – и нанотехнологий, общей тенденцией к микроминиатюризации приборов и устройств электроники, что проявляется в уменьшении толщины рабочих структур, синтезом многослойных и наноструктурированных композиций. Недостаточное исследование технологических

- дальнейшее развитие метода ионной имплантации с применением двухступенчатого отжига для изготовления высококачественных высоколегированных кремниевых слоев, которые так же могут служить контактными системами для ФЭП, позволит получить значения концентрации примесей на уровне $(6 \div 9) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, которые в 2,5 раза превышают границу равновесной растворимости;
- разработанная система автоматического управления отжигом полупроводниковых высоколегированных структур позволяет проводить термическую обработку одновременно в нескольких (до 15 -20) мини – печах и контролировать параметры с помощью ЭВМ, что обеспечивает высокое качество и экономичность процесса.

Л и т е р а т у р а

1. Lin Jyi-Tsong. A novel planar-type body connected FinFET device fabricated by self align isolation-last process // *Solid-State and Integrated Circuit Technology*. - 2010. - PP. 1235 - 1237.
2. V.V. Odinkov, G.Ya. Pavlov. New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics // *Technology and designing in the electronic equipment*. - 2011. - v.3. - PP. 41 - 43.
3. D.I. Levinson, A. Nikonov, O. Nebesnyuk. Modeling the distribution of impurities in the preparation of heavily instrumental silicon layers using high-energy treatment // *Proceedings of the international scientific conference «Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development 2013»* - 2013. - v. J21310.
4. Green M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond // *Physica*. - 2002. - Vol. E 14. - PP. 65 - 70.
5. Brown A. S., Green M. A. Limiting efficiency of multiple band solar cells: an overview // *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. - 2001. - PP. 246 - 249.
6. Norman A. G., Hanna M. C., Dippo P. et al. InGaAs/GaAs QD superlatives: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells // *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition*. - 2005. - PP. 3 - 7.
7. Maronchuk I. E., Erochin S. Yu., Kulutkina T. F. et al. Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy // *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. - 2003. - PP. 11 - 18.
8. Марончук И.Е., Марончук А.И., Кулюткина Т.Ф. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. - 2005. - №12. - С. 96 - 99.
9. Maronchuk I., Minailov A., Andronova E. et al. Quantum dots PV-cells obtained by liquid phase epitaxy // *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. - 2004. - PP. 352 - 354.
10. Maronchuk I. E., D.yachenko A. M., Minailov A. I. et al. Obtaining heterostructures with quantum dots for sensors by using liquid phase epitaxy // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. - 2004. - Vol. 7, N 4. - PP. 363 - 367.
11. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // *ФТП*. - 2004. - Т.38, вып. 8. - С. 937 - 947.
12. Круковский С.И., Николаенко Ю.Е. Солнечные элементы на основе тандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. - 2003. - №6. - С. 39 - 40.
13. Гореленок А.Т., Каманин А.В., Шмидт Н.М. Редкоземельные элементы в технологии соединений $A^{III}B^V$ и приборов на их основе // *ФТП*. - 2003. - Т. 37, вып. 8. - С. 922 - 940.

References

1. Lin Jyi-Tsong. A novel planar-type body connected FinFET device fabricated by self-align isolation-last process // *Solid-State and Integrated Circuit Technology*. - 2010. - PP. 1235 - 1237.
2. V.V. Odinkov, G. Pavlov. New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics // *Technology and designing in the electronic equipment*. - 2011. - v.3. - PP. 41 - 43.
3. D.I. Levinson, A. Nikonov, O. Nebesnyuk. Modeling the distribution of impurities in the preparation of heavily instrumental silicon layers using high-energy treatment // *Proceedings of the international scientific conference «Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development 2013»* - 2013. - v. J21310.
4. Green M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond // *Physica*. - 2002. - Vol. E 14. - PP. 65 - 70.
5. Brown A. S., Green M. A. Limiting efficiency of multiple band solar cells: an overview // *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. - 2001. - PP. 246 - 249.
6. Norman A. G., Hanna M. C., Dippo P. et al. InGaAs/GaAs QD superlatives: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells // *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition*. - 2005. - PP. 3 - 7.
7. Maronchuk I. E., Erochin S. Yu., Kulutkina T. F. et al. Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy // *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. - 2003. - PP. 11 - 18.
8. Maronchuk, I. E., Maronchuk A. I., Kulutkina T. F. the Formation of quantum dots during the process of liquid-phase epitaxy by pulse cooling of saturated solution-melt // *the Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*. - 2005. - №12. - PP. 96 - 99.
9. Maronchuk I., Minailov A., Andronova E. et al. Quantum dots PV-cells obtained by liquid phase epitaxy // *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. - 2004. - PP. 352 - 354.
10. Maronchuk I. E., D.yachenko A. M., Minailov A. I. et al. Obtaining heterostructures with quantum dots for sensors by using liquid phase epitaxy // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. - 2004. - Vol. 7, N 4. - PP. 363 - 367.

11. G. I. Alferov, Andreev V. M., Rumyantsev V. D. Trends and prospects of solar photovoltaics // FTP. - 2004. - Vol. 38, N 8. - PP. 937 - 947.
12. Krukovsky S. I., Nikolaenko Y. E. Solar elements based on tandem heterostructures GaAs-InGaAs-AlGaAs / / Technology and design in electronic equipment. - 2003. - №6. - PP. 39 - 40.
13. Gorelenok A. T., V. Kamanin, A., Schmidt N. M. Rare-earth elements in the technology of AІІІВV connections and devices on their basis // FTP. - 2003. - Vol. 37, N 8. - PP. 922 - 940.

Небеснюк О.Ю., Ніконова А.О., Хрипко С.Л., Ніконова З.А. Перспективні напрями підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів та створення якісних контактних систем.

Сонячні елементи є ключовим фактором у сучасній енергетиці та перебувають у центрі економічних, соціальних та екологічних цілей світового розвитку. Обсяг виробництва сонячних фотоелектричних систем зростає в середньому на 30% на рік. Поліпшення якості, використання нових напівпровідникових матеріалів і способів металізації дозволило розробити ряд нових електронних приладів. Великі можливості відкриває використання епітаксійних композицій для виготовлення фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). У статті запропоновано перспективні напрями підвищення ефективності ФЕП на епітаксійних структурах, нова технологія створення контактних систем (КС) для ФЕП та проведено дослідження їх стабільності. При цьому формувалися дуже високі вимоги до електрофізичних властивостей вихідних матеріалів.

Ключові слова: кремній, епітаксійні композиції, контактні системи, пластина, фотоелектричні перетворювачі

Nebesniuk O.Y., Nikonova A.A., Khripko S.L., Nikonova Z.A. Perspective directions of photoelectric transformes and creation of quality contact systems.

Solar cells are a key factor in modern energy and are at the center of economic, social and environmental goals of world development. The production of solar photovoltaic systems is increasing by an average of 30% per year. The improvement of quality, the use of new semiconductor materials and metallization methods allowed developing a number of new electronic devices. Great opportunities open up the use of epitaxial compositions for the manufacture of photovoltaic converters. The article proposes promising ways to improve the efficiency of photovoltaic converters on epitaxial structures, a new technology for creating contact systems and a study of their stability. At the same time, very high requirements for the electrical properties of the raw materials were formed.

Keywords: silicon, epitaxial compositions, contact systems, photovoltaic converters

Небеснюк О.Ю. – к.т.н., доцент кафедри «Мікроелектронні інформаційні системи» Запорізької державної інженерної академії, e-mail: 0811oksana@gmail.com

Ніконова А.О. – к.т.н., доцент кафедри «Мікроелектронні інформаційні системи» Запорізької державної інженерної академії, e-mail: nk_alina@ukr.net

Хрипко С.Л. – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Мікроелектронні інформаційні системи» Запорізької державної інженерної академії, e-mail: ug9qq@ukr.net

Ніконова З.А. к.т.н., професор кафедри «Мікроелектронні інформаційні системи» Запорізької державної інженерної академії, e-mail: nza@zgia.zp.ua

Рецензент: д.т.н., проф. **Суворін А.В.**

Стаття подана 16.05.2018