

Исследование морфологии поверхности и электропроводности пленок кремния после лазерного отжига

А.В. Саенко, А.В. Ковалев, В.В. Бесполудин, А.А. Прилипко

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
Южный федеральный университет*

Аннотация: Проведено исследование морфологии поверхности и удельной электропроводности нанокристаллической пленки кремния на стеклянной подложке от мощности лазерного отжига. Лазерный отжиг осуществлялся Nd:YAG лазером с длиной волны 532 нм, скоростью перемещения предметного столика с образцом 5 мм/с и мощностью лазерного излучения в пределах от 34 до 86 Вт. Лазерный луч фокусировался на образце в виде узкой линии шириной 10 мкм и длиной 60 мм. Определены зависимости размера нанокристаллов и удельной электропроводности пленок кремния от мощности излучения лазерного отжига. Показано, что мощность лазерного излучения в диапазоне от 60 до 70 Вт является оптимальной для получения наилучших электрофизических параметров кремниевой пленки с целью её использования в высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементах.

Ключевые слова: пленка кремния, лазерный отжиг, морфология поверхности, удельная электропроводность, тонкопленочный солнечный элемент.

Введение

Воздействие лазерного излучения на полупроводники может приводить к различным изменениям их кристаллической структуры, электрофизических и оптических свойств. В настоящее время лазерный отжиг широко применяется для создания пленок поликристаллического кремния, который перспективен для использования в тонкопленочных солнечных элементах, а также транзисторах, жидкокристаллических дисплеях и сенсорах за счет рекристаллизации аморфных и нанокристаллических пленок кремния [1-3].

Описание эксперимента

В процессе лазерного отжига использовались пять однородных образцов нанокристаллического кремния (толщина 1,2-1,3 мкм) на стеклянной подложке, полученные центрифугированием суспензии на основе наночастиц кремния (средний размер частиц 20 нм). Образцы подвергались

воздействию Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм (ЛИМО 100-532/1064), длительностью импульса 55 нс и частотой следования импульсов 10 кГц. Лазерный луч фокусировался на образце в виде узкой линии шириной 10 мкм и длиной 60 мм. При лазерном отжиге скорость перемещения предметного столика для образцов составляла 5 мм/с, а мощность лазерного излучения изменялась в пределах от 34 до 86 Вт (шаг 13 Вт) [3-6].

Исследование морфологии поверхности пленок кремния на стеклянной подложке осуществлялось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Nova Nanolab 600. Исследование электрофизических параметров пленок кремния осуществлялось с помощью установки ЭДС Холла Escoria HMS-3000.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения морфологии поверхности пленок кремния в зависимости от мощности излучения лазерного отжига. Исходные кремниевые нанокристаллы имели средний размер 20 нм (рис. 1, а). В результате лазерного отжига пленок кремния установлено, что с увеличением мощности лазерного излучения наблюдается возрастание размера нанокристаллов в пленке до порядка 400 нм в результате спекания исходных наночастиц. При мощности лазерного излучения 34 Вт поверхность пленки кремния остается практически без изменений (рис. 1, б). После лазерного отжига излучением с мощностью 47 Вт размер нанокристаллов кремния значительно увеличивается до примерно 100 нм, при этом в пленке присутствуют незатронутые агломераты нанокристаллов (рис. 1, в). Тенденция дальнейшего увеличения размера кристаллов с увеличением мощности продолжается (рис. 1, г, д), так при значении мощности 60 Вт образуются ярко выраженные боковые кремниевые соединения в пределах всей пленки (формируется кремниевая сетчатая структура). Мощность лазерного излучения 73 Вт (рис. 1, д) приводит к

образованию дополнительных относительно больших сферических структур сверху спеченной кремниевой сетчатой структуры. Наблюдаемый размер этих сферических структур имеет значение порядка 400 нм и дальнейшее повышение мощности не приводит к росту размера данных структур (рис. 1, е). Однако при мощности 86 Вт и более происходит ухудшение общей морфологии пленки кремния вследствие начала протекания процесса абляции кремния с подложки.

Таким образом, мощность лазерного излучения в диапазоне от 60 до 73 Вт является оптимальной для получения наилучшего качества кремниевой пленки при лазерном отжиге.

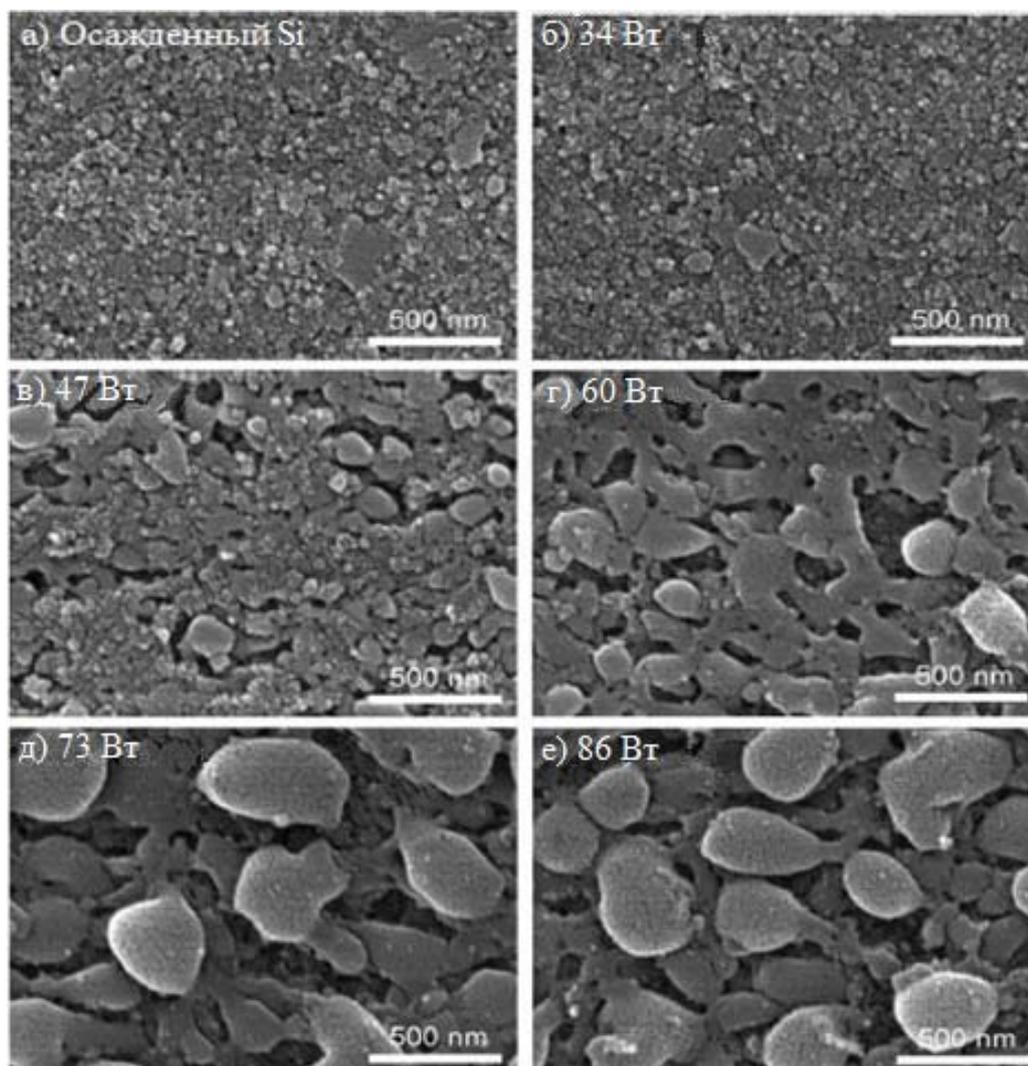


Рис. 1 – РЭМ-изображения морфологии поверхности пленок кремния

На рис. 2 представлены результаты исследования удельной электропроводности пленок кремния в зависимости от мощности лазерного отжига. Получено, что при увеличении мощности лазерного излучения до 60-70 Вт наблюдается увеличение электропроводности кремния в результате формирования кремниевой сетчатой структуры, в то время как дальнейшее увеличение мощности приводит к её снижению. Снижение удельной электропроводности пленок при мощностях от 73 до 86 Вт происходит в результате образования больших сферических структур и частичного разрушения поверхностных слоев кремния из-за начала протекания процесса абляции [5, 7-10]. Таким образом, наблюдаемые значения удельной электропроводности значительно связаны со структурными изменениями поверхностной морфологии пленки кремния при лазерном отжиге.

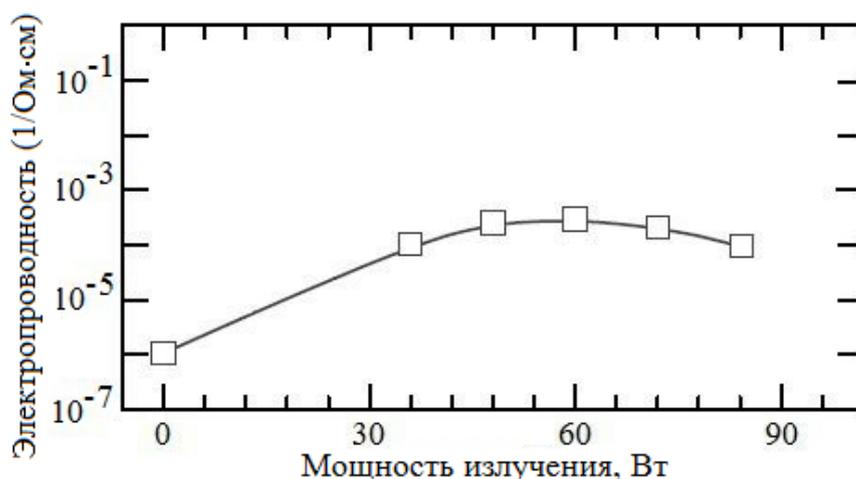


Рис. 2 – Зависимость удельной электропроводности пленки кремния от мощности лазерного излучения

Возрастание удельной электропроводности пленки кремния с увеличением размера кристаллов может быть связано с уменьшением количества границ между кристаллами вследствие их спекания, поскольку границы между кристаллами представляют собой области с высокой плотностью дефектов и примесей, сегрегированных в процессе осаждения пленки, и являющиеся энергетическими потенциальными барьерами. Также

вероятнее всего происходит изменение механизма проводимости, т.е. с туннелирования через потенциальные барьеры на зонный перенос электронов вследствие процессов спекания и плавления, что способствует значительному увеличению удельной электропроводности [5-7].

Вывод

На основе экспериментальных исследований лазерного отжига определены зависимости размера нанокристаллов и удельной электропроводности пленок кремния от мощности излучения лазерного отжига. Показано, что мощность лазерного излучения в диапазоне от 60 до 70 Вт является оптимальной для получения наилучших электрофизических параметров кремниевой пленки. Таким образом, лазерный отжиг позволяет значительно изменять размер нанокристаллов и удельную электропроводность полупроводниковых структур, что делает его важной технологической операцией при изготовлении высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов.

Результаты получены с использованием оборудования НОЦ «Лазерные технологии», ЦКП и НОЦ «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

Статья написана в рамках выполнения проекта ФЦП Россия № 14.587.21.0025. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58716X0025.

Литература

1. Y.F. Tang, S.R.P. Silva, M.J. Rose. Super sequential lateral growth of Nd:YAG laser crystallized hydrogenated amorphous silicon // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78. pp. 186-188.



2. R. Dassow, J.R. Kohler, M. Grauvogl, R.B. Bergmann, J.H. Werner. Laser-crystallized polycrystalline silicon on glass for photovoltaic applications // Solid State Phen. 1999. Vol. 67-68. pp. 193-198.
 3. Е.Ю. Волков, В.Н. Лисоченко, Р.В. Конакова, О.Б. Охрименко, А.М. Светличный. Влияние лазерной обработки на свойства пленок аморфного кремния // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. № 1/2. С. 143-146.
 4. Duan Chunyan, Liu Chao, Ai Bin, Lai Jianjun, Deng Youjun, Shen Hui. Selected area laser-crystallized polycrystalline silicon thin films by a pulsed Nd:YAG laser with 355 nm wavelength // Journal of Semiconductors. 2011. Vol. 32. № 12. pp. 123-128.
 5. Ferreira I., Carvalho J., Martins R. Undoped and doped crystalline silicon films obtained by Nd:YAG laser // Thin Solid Films. 1998. Vol. 317. Issues 1-2. pp. 140-143.
 6. Малуков С.П., Куликова И.В., Калашников Г.В. Моделирование процесса лазерного отжига структуры «кремний-стекловидный диэлектрик» // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №7. С.182-188.
 7. Malyukov S.P., Sayenko A.V. Laser sintering of a porous TiO₂ film in dye-sensitized solar cells // Journal of Russian Laser Research. Vol. 36. Issue 3. 2013. pp. 276-280.
 8. Malyukov S.P., Yu.V. Klunnikova, A.V. Sayenko. Laser Annealing of Oxide Films on the Sapphire Surface // Journal of Russian Laser Research. Vol. 36. Issue 3. 2015. pp. 276-280.
 9. Куликова И.В. Разработка модели для расчета напряженно-деформированных состояний в полупроводниковых структурах при лазерном воздействии // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2378.
-



10. Куликова И.В., Малюков С.П., Калашников Г.В., Приступчик Н.К. Исследование влияния режимов работы Nd:YAG лазера на напряженно – деформированные состояния в обрабатываемой полупроводниковой структуре // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2000.

References

1. Y.F. Tang, S.R.P. Silva, M.J. Rose. Super sequential lateral growth of Nd:YAG laser crystallized hydrogenated amorphous silicon // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78. pp. 186-188.
2. R. Dassow, J.R. Kohler, M. Grauvogl, R.B. Bergmann, J.H. Werner. Laser-crystallized polycrystalline silicon on glass for photovoltaic applications. Solid State Phen. 1999. Vol. 67-68. pp. 193-198.
3. E.Yu. Volkov, V.N. Lisochenko, R.V. Konakova, O.B. Okhrimenko, A.M. Svetlichnyy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika. 2011. № 1/2. pp. 143-146.
4. Duan Chunyan, Liu Chao, Ai Bin, Lai Jianjun, Deng Youjun, Shen Hui. Selected area laser-crystallized polycrystalline silicon thin films by a pulsed Nd:YAG laser with 355 nm wavelength. Journal of Semiconductors. 2011. Vol. 32. № 12. pp. 123-128.
5. Ferreira I., Carvalho J., Martins R. Undoped and doped crystalline silicon films obtained by Nd:YAG laser. Thin Solid Films. 1998. Vol. 317. Issues 1-2. pp. 140-143.
6. Malyukov S.P., Kulikova I.V., Kalashnikov G.V. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2011. №7. pp.182-188.
7. Malyukov S.P., Sayenko A.V. Laser sintering of a porous TiO₂ film in dye-sensitized solar cells // Journal of Russian Laser Research. Vol. 36. Issue 3. 2013. PP. 276-280.



8. Malyukov S.P., Yu.V. Klunnikova, A.V. Sayenko. Laser Annealing of Oxide Films on the Sapphire Surface // Journal of Russian Laser Research. Vol. 36. Issue 3. 2015. PP. 276-280.
9. Kulikova I.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2378.
- 10 Kulikova I.V., Malyukov S.P., Kalashnikov G.V., Pristupchik N.K. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2000.