

УДК 621.315.592

**А.В. Алпатов, И.А. Верин, С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, С.А. Кострюков,
В.Г. Мишустин**

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Проводится исследование контактных явлений в фотодатчиках и фотоэлектрических преобразователях на основе наноструктурированных неупорядоченных полупроводников. Эффект Стеблера-Вронского приводит не только к ухудшению транспортных свойств полупроводника, но и к перераспределению контактного поля и ухудшению собирания фотогенерированных носителей. Таким образом, деградация приборов обусловлена не только возникновением фотоиндуцированных дефектов, но и их влиянием на контактные явления в наноструктурированных неупорядоченных полупроводниках.

Ключевые слова: фотодатчики, контактные явления, наноструктурированные неупорядоченные полупроводники, модифицированный времяпролетный метод.

Введение. Неупорядоченные полупроводники получили широкое распространение как в экспериментальной, так и в прикладной физике. Одной из областей применения этих материалов является оптоэлектроника: детекторы жесткого ионизирующего излучения, фотоэлектрические датчики, солнечные элементы и т.д. "Традиционной" проблемой фотоэлектрических датчиков на основе неупорядоченных полупроводников является нестабильность их электрофизических характеристик. Одной из причин этого является генерация фотоиндуцированных дефектов в материале под действием света – эффект Стеблера-Вронского [1].

Одним из наиболее распространенных оптоэлектронных материалов являются аморфный гидрогенизированный кремний (a-Si:H) и сплавы на его основе (a-SiC:H, a-SiGe:H). Оптические и электрические характеристики a-Si:H определяются плотностью состояний в запрещенной зоне и их распределением по энергии, а также содержанием кристаллической фазы в аморфной матрице [2]. Наличие непрерывного по энергии спектра плотности состояний в a-Si:H обуславливает отличия контактных явлений в этом материале от кристаллического кремния. Поскольку контакт металл - полупроводник (полупроводник – полупроводник) присутствует в фотоэлектрических датчиках как в качестве активного элемента, так и в качестве омического контакта, исследование контактных явлений в a-Si:H

является актуальной научной и прикладной задачей.

Целью данной работы является определение влияния эффекта Стеблера-Вронского на процессы деградации параметров фотодатчика с учетом контактных явлений в барьере металл – полупроводник в зависимости от параметров контактирующих материалов (работы выхода, плотности состояний вблизи уровня Ферми и т.д.). Задача эксперимента состоит в измерении распределения напряженности и электростатического потенциала контактного электрического поля в тонкопленочной барьерной структуре на основе a-Si:H.

Методика эксперимента. В данной работе для экспериментального исследования распределения напряженности внутреннего электрического поля в барьерной структуре используется модифицированный времяпролетный метод (МВПМ) [3]. На рисунке 1 проиллюстрирован физический принцип МВПМ-измерений. Суть метода заключается в измерении коэффициента собирания носителей заряда, генерированных коротким импульсом монохроматического света, в зависимости от напряжения внешнего электрического поля. С целью повышения точности измерений импульс внешнего напряжения 2 прикладывается навстречу внутреннему полю 1. В результате в структуре устанавливается суммарное поле 3, для которого в точке (x_c) электростатический потенциал имеет минимум, а его напряженность

Si:H) как "типичного" представителя полупроводниковых материалов этого класса. Содержание кристаллической фазы в аморфной матрице изменяется от 5 до 40% в зависимости от условий получения [6]. Образцы представляют собой тонкопленочную барьерную структуру с сэндвич-конфигурацией электродов, нанесенную на стеклянную подложку с прозрачным проводящим покрытием TCO (Transparent Conductive Oxide) (рисунок 3, а).

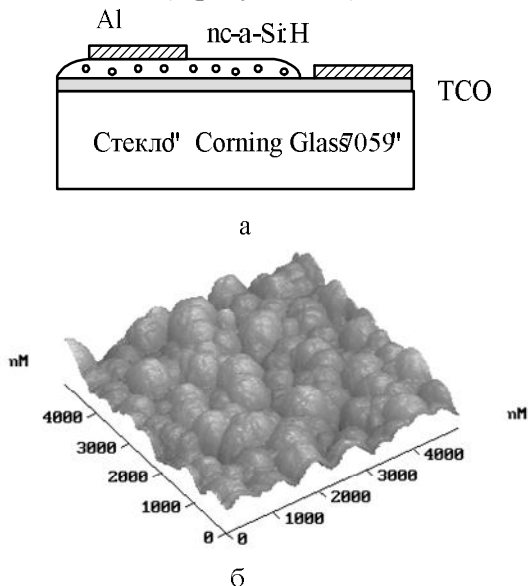


Рисунок 3 – Барьерная структура на основе пnc-a-Si:H: а – структура образца; б – топология поверхности пленки пnc-a-Si:H

Результаты и обсуждение. Для экспериментального измерения распределения напряженности электрического поля (F) с помощью МВПМ для каждой исследуемой структуры необходимо определять спектральную зависимость коэффициента оптического поглощения (α) и толщину полупроводниковой пленки (d) [3]. Спектральная зависимость (α) определялась с помощью спектрофотометра СФ-26. Толщина пленки пnc-a-Si:H и топология ее поверхности исследовались с помощью атомно-силового микроскопа Solver-Pro (рисунок 3, б) [6]. Эти измерения проводились на пластинах-спутниках, не имеющих слоя TCO и металлизации.

Результаты измерений напряженности внутреннего электрического поля в барьерных структурах на основе пnc-a-Si:H представлены на рисунке 4. По этим результатам рассчитано распределение электростатического потенциала (рисунок 5). Экспериментальные образцы представляют собой структуры с барьером Шоттки – обозначены буквой (а) на рисунках 4 и 5, и p-i-n структуры – обозначены буквой (б) соответственно [7].

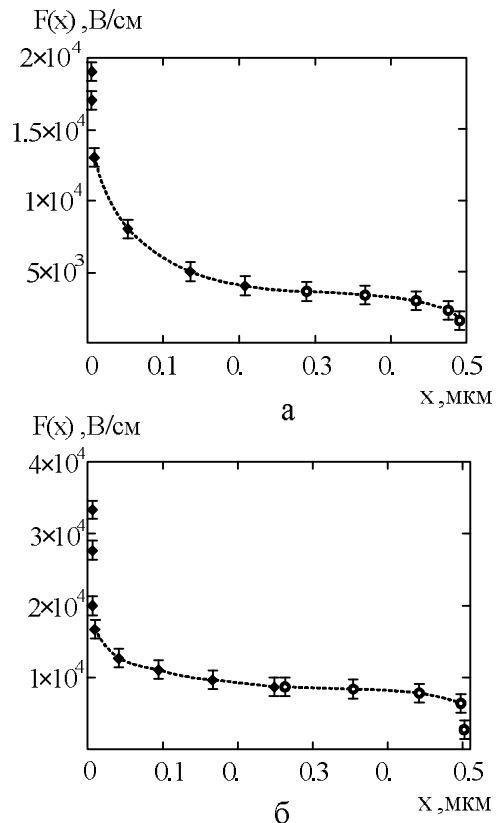


Рисунок 4 – Распределение напряженности контактного поля в пnc-a-Si:H: а – структура с барьером Шоттки, б – p-i-n структура

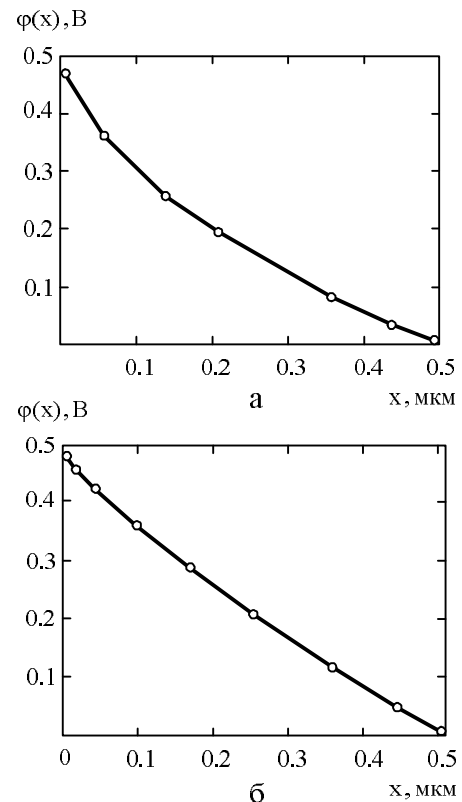


Рисунок 5 – Распределение электростатического потенциала в пnc-a-Si:H: а – структура с барьером Шоттки, б – p-i-n структура

Анализ экспериментальных результатов показал, что напряженность электрического поля в барьерных структурах на основе nc-a-Si:H, также как и для c-Si, достигает своего максимального значения вблизи границы раздела металл – полупроводник (полупроводник – полупроводник), но в отличие от c-Si перераспределяется по ширине области пространственного заряда. Это приводит к тому, что профиль барьера "утончается", вследствие чего становится возможным квантово-механическое туннелирование носителей заряда сквозь барьер. В результате эффективная высота потенциального барьера понижается, причем это понижение тем заметнее, чем больше плотность состояний в щели подвижности полупроводника [7].

Зависимость эффективной высоты потенциального барьера от величины плотности состояний может иметь как негативное влияние на характеристики приборов, так и положительное практическое применение в приборостроении. В частности, описанный эффект лежит в основе предложенного способа создания омических контактов к неупорядоченным полупроводникам за счет создания дополнительных дефектов в полупроводниковой пленке в приконтактной области [8].

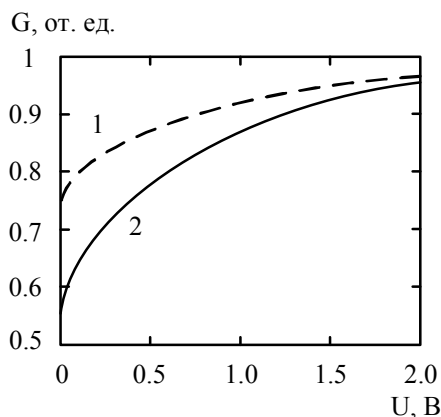


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента собирания фотогенерированного заряда в структуре Al - nc-a-Si:H в зависимости от приложенного напряжения

Негативное влияние такой зависимости является одним из проявлений эффекта Стеблера-Вронского и заключается в деградации фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе неупорядоченных полупроводников при длительном освещении. Возникновение дополнительных фотоиндуцированных дефектов, с одной стороны, приводит к ухудшению транспортных свойств полупроводника, а с другой – является причиной перераспределения встроенного контактного поля и, как следствие, уменьшения коэффициента собирания фотогенери-

рованных носителей. На рисунке 6 представлены расчетные зависимости коэффициента собирания фотогенерированного заряда (G) от внешнего приложенного напряжения (U) в барьерной структуре Al – nc-a-Si:H без учета (1) и с учетом (2) дополнительных потерь из-за перераспределения встроенного контактного поля [9].

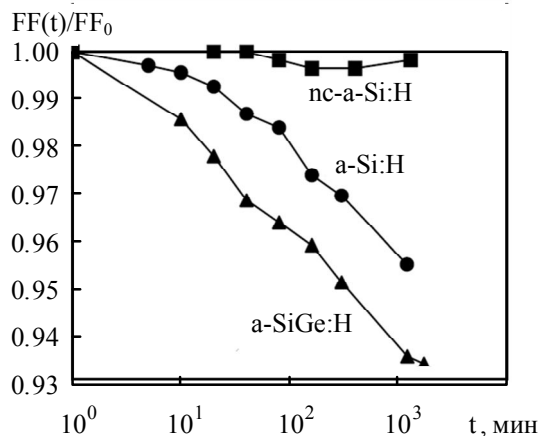


Рисунок 7 – Зависимость нормированного коэффициента заполнения ВАХ от времени воздействия прямого напряжения для однослойных ФЭП [11]

Одним из технологических методов повышения эффективности и стабильности фотодатчиков и ФЭП на основе a-Si:H и его сплавов является введение в аморфную матрицу микро- и нанокристаллических включений кремния (nc-a-Si:H, nc-a-Si:H). Это позволяет принципиально улучшить электрофизические и эксплуатационные характеристики a-Si:H и приборов на его основе [10]. На рисунке 7 показана зависимость нормированного коэффициента заполнения FF (Full Factor) вольт-амперной характеристики (ВАХ) для однопереходных ФЭП на основе a-Si:H, a-SiGe:H и nc-a-Si:H как функция от времени воздействия прямого электрического поля ($FF(t)/FF_0$). Из рисунка 7 видно, что ФЭП на основе nc-a-Si:H практически не меняет своих характеристик при данном виде воздействия. Такая стабильность объясняется в рамках модели "встречно включенных барьеров" (back-to-back diode model), предложенной в работе [11]. Ее суть заключается в том, что на границах раздела нанокристаллических включений и аморфного кремния возникают гетеропереходы. Контактное поле этих барьеров затягивает фотогенерированные носители, так что рекомбинация происходит не в аморфной пленке, а на границах раздела. Это позволяет избежать появления дополнительных фотоиндуцированных (электроиндуцированных) дефектов в пленке a-Si:H, что улучшает стабильность материала.

Заключение. Таким образом, модификация

a-Si:H и родственных ему материалов за счет нанокристаллических включений позволяет получить более стабильный по сравнению с a-Si:H материал с требуемыми фотоэлектрическими параметрами. Поскольку nc-a-Si:H изготавливается на том же оборудовании, что и a-Si:H, он обладает хорошей технологической совместимостью с ним, а наличие нанокристаллических включений в аморфной пленке позволяет стабилизировать как транспортные свойства полупроводника, так и свойства контактов.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования РФ.

Библиографический список

1. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы. – М.: Мир, 1986. – 440 с.
2. C.R. Wronski, J.M. Pearce, J. Deng et al. Intrinsic and light induced gap states in a-Si:H materials and solar cells - effects of microstructure // *Thin Solid Films* 451 – 452 (2004). P. 470 – 475.
3. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Разработка фундаментальных основ время-пролетного метода исследования некристаллических полупроводников // Отчет о НИР 2-05Г / Рук. Вихров С.П., № Госрегистрации 01200501803. Рязань. 2007. 52 с.
4. N. Wyrsh, N. Beck, J. Meier et al. Electric field profile in μ c-Si:H p-i-n devices // *Proc. of the 11th European PVSEC, Montreux, (1992)*. P. 742 – 747.
5. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Формирование потенциальных барьеров в нелегированных неупорядоченных полупроводниках // *Физика и техника полупроводников*, 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1189 – 1194.
6. Уточкин И.Г. Исследование структурных и электрофизических характеристик пленок на основе a-Si:H, полученных в плазме НЧ разряда / Дисс. канд. физ.-мат. наук: Рязань, 2005. 171 с.
7. Мишустин В.Г. Исследование влияния локализованных состояний на распределение пространственного заряда в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников / Дисс. канд. физ.-мат. наук: Рязань, 2008. 185 с.
8. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Способ создания омических контактов в тонкопленочных устройствах на аморфных гидрогенизированных полупроводниках // Патент РФ № 2229755. 2004.
9. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Коэффициент собирания фотогенерированных носителей заряда в тонкопленочных структурах на основе неупорядоченных полупроводников // Сборник трудов V Международной конференции "Аморфные и микрокристаллически полупроводники" Санкт-Петербург, Из-во Политехнического университета, 2006. С. 165 – 166.
10. S. Guha and J. Yang. High-Efficiency Amorphous Silicon Alloy Based Solar Cells and Modules // *Final Technical Progress Report. United Solar Ovonic Corporation. Troy, Michigan. (2005)*. 130 p.
11. G. Yue, B. Yan, G. Ganguly et al. Metastability in Hydrogenated Nanocrystalline Silicon Solar Cells // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 910 (2006)*. P. A-02-01 – A-02-12.