

Д.В. Алмазов, А.В. Алпатов, Ю.В. Воробьёв,
С.А. Кострюков, В.Г. Мишустин

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Исследуются контактные явления в барьерных структурах 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.

барьерные структуры, 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 их применения является оптоэлектроника (детекторы жесткого ионизирующего излучения, фотоэлектрические датчики, солнечные элементы и т.д.). Однако проблемой фотоэлектрических датчиков на основе неупорядоченных полупроводников остается нестабильность их электрофизических характеристик. Одна из причин этого состоит в генерации фотоиндуцированных дефектов в материале под действием света – эффект Стеблера – Вронского [8].

Наиболее распространенным оптоэлектронным материалом является 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 ее распределением по энергии, а также от содержания кристаллической фазы в аморфной матрице [9]. 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 (барьерная структура), так и в качестве омического контакта, исследование контактных явлений в a-Si:H – актуальная научная и прикладная задача.

Цель данной работы состоит в определении влияния эффекта Стеблера – Вронского на процессы деградации параметров фотоэлемента с учетом контактных явлений в барьере металл – полупроводник в зависимости от параметров контактирующих материалов (работа выхода, плотность состояний вблизи уров-

ня Ферми и т.д.). Задачей эксперимента является измерение 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 (F) равна нулю.

Поскольку время максвелловской релаксации в неупорядоченных полупроводниковых материалах достаточно велико (вплоть до 10^3 с), то внутреннее поле (F) в них не успевает перераспределяться и может быть определено по величине внешнего поля, при котором коэффициент собирания заряда равен нулю [10]:

$$F(x_c) = \frac{V_{G=0}}{d}. \quad (1)$$

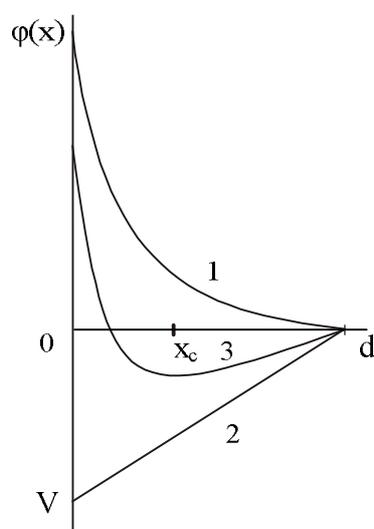


Рис. 1. Иллюстрация физического принципа МВПМ-измерений: 1 – потенциал внутреннего электрического поля; 2 – потенциал внешнего поля; 3 – суммарный потенциал

Координата (x_c), в которой измеряется напряженность поля, рассчитывается через значения толщины экспериментальной структуры (d) и коэффициента оптического поглощения (α) на данной длине волны [4]:

$$x_c \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{x_c}\right) \right] = \exp(-\alpha d)(d - x_c) \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{d - x_c}\right) \right]. \quad (2)$$

При изменении длины волны падающего света и соответственно коэффициента оптического поглощения (α) изменяется координата (x_c), в которой внешнее поле компенсирует внутреннее, и таким образом измеряется распределение напряженности внутреннего электрического поля по толщине исследуемой барьерной структуры.

Функциональная схема экспериментально-измерительного комплекса представлена на рисунке 2. Технически МВПМ реализуется следующим образом. Электрическое поле подается от генератора прямоугольных импульсов (1), управляемого ЭВМ (10). Спустя время задержки t_{del} , которое выбирается из условия $\tau_{RC} < t_{del} < \tau_{rel}$, где τ_{RC} – постоянная времени прецизионного дифференциального интегрирующего усилителя (8), τ_{rel} – время максвелловской релаксации или время перераспределения поля в структуре из-за инжекции или других механизмов, запускается высоковольтный источник питания (2) и срабатывает импульсная лампа-вспышка (3). Монохроматором МДР-23 (4) выбирается нужная длина волны освещения. Часть светового импульса отводится с помощью полупрозрачного зеркала (5) на блок регистрации и контроля интенсивности освещения (6), другая часть попадает в измерительную ячейку (7) и освещает исследуемую структуру. Ток фотогенерированных носителей интегрируется с помощью прецизионного дифференциального усилителя (8), и измеряемый сигнал поступает в ЭВМ с помощью схемы сопряжения (9). Выполнение условия $\tau_{RC} < t_{del} < \tau_{rel}$ проверяется экспериментально. Амплитуда внешнего электрического поля подбирается такой, что суммарный заряд, протекающий во внешней цепи, равен нулю. Напряженность поля определяется по формуле (1), а координата, в которой она измеряется, рассчитывается по формуле (2).

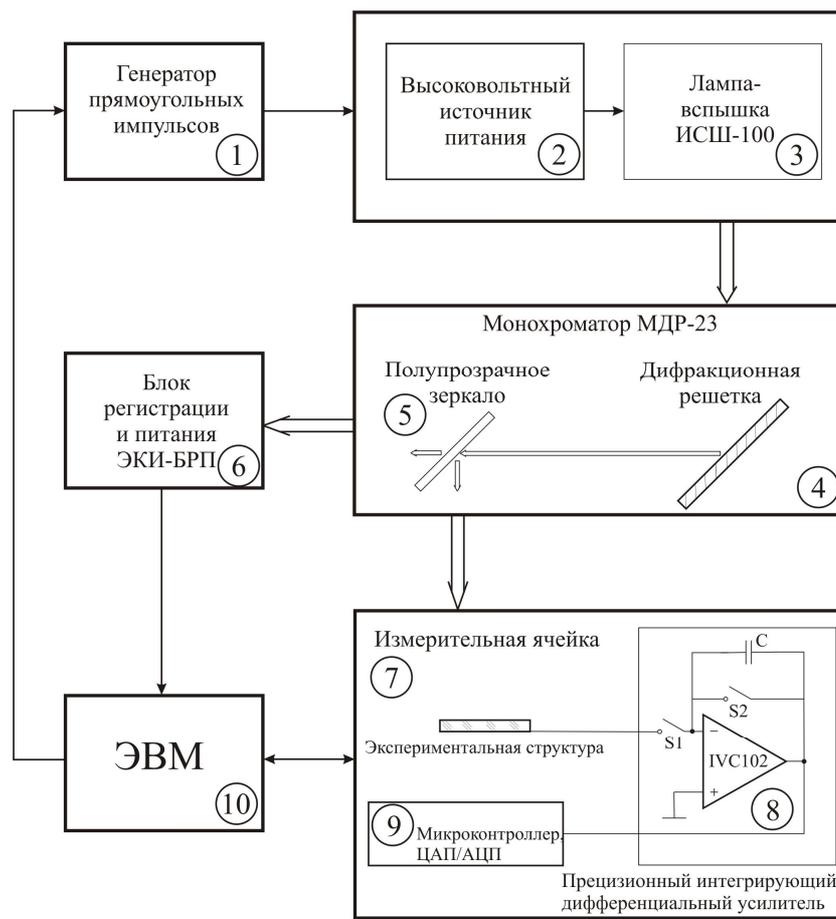


Рис. 2. Функциональная схема экспериментально-измерительного комплекса МВІМ

В качестве объектов исследований были выбраны образцы наноструктурированного аморфного гидрогенизированного кремния (nc-a-Si:H) как «типичного» представителя полупроводниковых материалов этого класса. Содержание кристаллической фазы в аморфной матрице изменяется от 5 до 40 процентов в зависимости от условий его получения [6]. Образцы представляют собой тонкопленочную барьерную структуру с сэндвич-конфигурацией электродов, нанесенную на стеклянную подложку с прозрачным проводящим покрытием TCO (Transparent Conductive Oxide) (рис. 3 а).

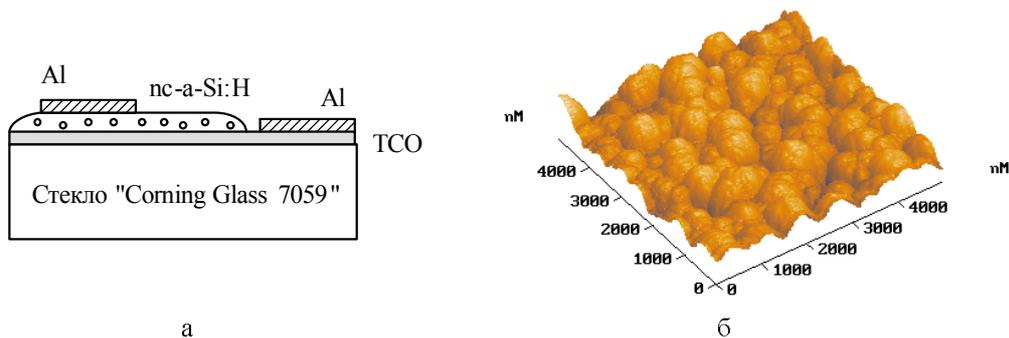


Рис. 3. Барьерная структура на основе nc-a-Si:H:
 а) структура образца; б) топология поверхности пленки nc-a-Si:H

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 nc-a-Si:H и топология ее поверхности исследовались с помощью атомно-силового микроскопа Solver-Pro (рис. 3 б) [6]. Эти измерения проводились на пластинах-спутниках, не имеющих слоя ТСО и металлизации.

Результаты измерений напряженности внутреннего электрического поля в барьерных структурах на основе nc-a-Si:H представлены на рисунке 4. По этим результатам рассчитано распределение электростатического потенциала (рис. 5). Экспериментальные образцы представляют собой структуры с барьером Шоттки (обозначены буквой (а) на рисунках 4 и 5) и р-і-п структуры (обозначены буквой (б) на тех же рисунках) [5].

Анализ экспериментальных результатов показал, что напряженность электрического поля в барьерных структурах на основе nc-a-Si:H так же, 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 [5].

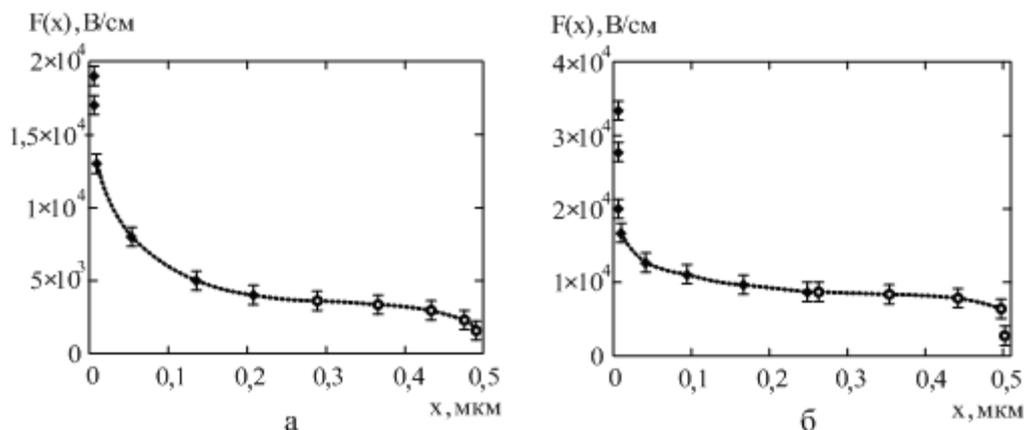


Рис. 4. Распределение напряженности контактного поля в ps-a-Si:H:
 а) структура с барьером Шоттки, б) p-i-n структура

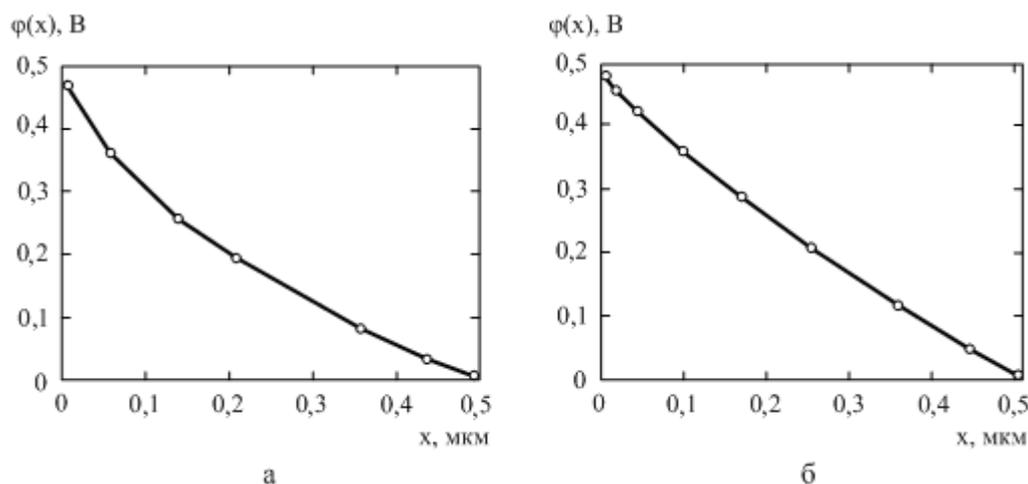


Рис. 5. Распределение электростатического потенциала в ps-a-Si:H:
 а) структура с барьером Шоттки, б) p-i-n структура

Зависимость эффективной высоты потенциального барьера от величины плотности состояний может 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 [1].

Негативное влияние такой зависимости является одним из проявлений эффекта Стеблера – Вронского и заключается в деградации фотоэлектрических

преобразователей на основе неупорядоченных полупроводников при длительном освещении. Возникновение дополнительных фотоиндуцированных дефектов, с одной стороны, приводит к ухудшению транспортных свойств полупроводника, а с другой – служит причиной перераспределения встроенного контактного поля и, как следствие, уменьшения коэффициента сбора фотогенерированных носителей. На рисунке 6 представлены расчетные зависимости коэффициента сбора 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 [2].

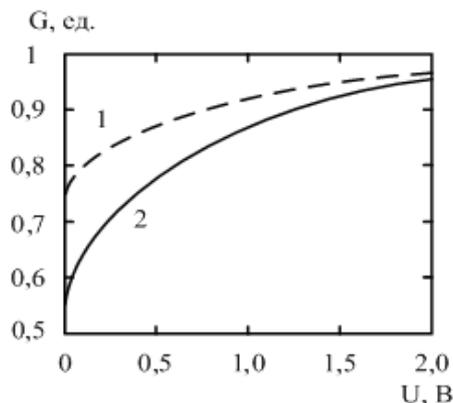


Рис. 6. Зависимость коэффициента сбора фотогенерированного заряда в структуре Al – nc-a-Si:H в зависимости от приложенного напряжения

Одним из технологических методов повышения эффективности и стабильности фотодатчиков и фотоэлектрических преобразователей 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 [8]. На рисунке 7 показана зависимость нормированного коэффициента заполнения (FF) вольт-амперной характеристики как функция от времени воздействия прямого электрического поля для однопереходных фотоэлектрических преобразователей на основе a-Si:H, a-SiGe:H и nc-a-Si:H. Из рисунка видно, что фотоэлектрический преобразователь 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 таких барьеров затягивает фотогенерированные носители, так что рекомбинация происходит не в аморфной пленке, а на границах раздела. Это позволяет избежать появ-

ления дополнительных фотоиндуцированных (электроиндуцированных) дефектов в пленке a-Si:H, что улучшает стабильность материала.

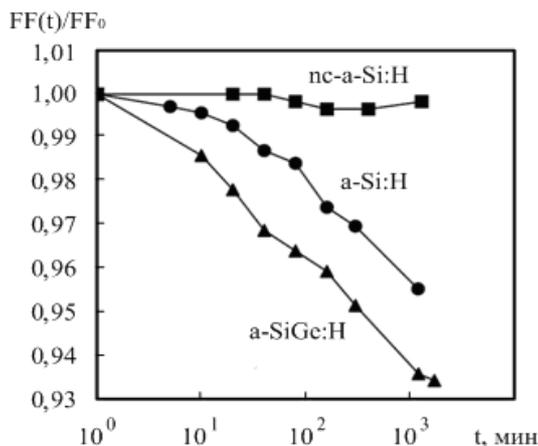


Рис. 7. Зависимость нормированного коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики от времени воздействия прямого напряжения для однослойных фотоэлектрических преобразователей [11]

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 с ним технологической совместимостью, а наличие нанокристаллических включений в аморфной пленке позволяет стабилизировать как транспортные свойства полупроводника, так и свойства контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авачёв, А.П. Способ создания омических контактов в тонкопленочных устройствах на аморфных нелегированных полупроводниках [Текст] : патент РФ № 2392688 / А.П. Авачёв [и др.] ; заявитель и патентообладатель Федеральное агентство по образованию Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Рязанский государственный радиотехнический университет – № 2009118861/28 ; заявл. 20.05.2009 ; опубл. 20.06.2010.
2. Вихров, С.П. Коэффициент сбора фотогенерированных носителей заряда в тонкопленочных структурах на основе неупорядоченных полупроводников [Текст] / С.П. Вихров [и др.] // Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб. тр. V Междунар. конф. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 165–166.
3. Вихров, С.П. Разработка фундаментальных основ времяпролетного метода исследования некристаллических полупроводников [Текст] : отчет о НИР 2-05Г /

С.П. Вихров [и др.] ; рук. С.П. Вихров ; РГРТУ. – Рязань, 2007. – 52 с. – № ГР 01200501803.

4. Вихров, С.П. Формирование потенциальных барьеров в нелегированных неупорядоченных полупроводниках [Текст] / С.П. Вихров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – Вып. 10. – С. 1189–1194.

5. Мишустин, В.Г. Исследование влияния локализованных состояний на распределение пространственного заряда в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Рязань, 2008. – 185 с.

6. Уточкин, И.Г. Исследование структурных и электрофизических характеристик пленок на основе a-Si:H, полученных в плазме НЧ разряда [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Рязань, 2005. – 171 с.

7. Чопра, К. Тонкопленочные солнечные элементы [Текст] / К. Чопра, С. Дас. – М. : Мир, 1986. – 440 с.

8. Guha, S. High-Efficiency Amorphous Silicon Alloy Based Solar Cells and Modules [Text] / S. Guha, J. Yang // Final Technical Progress Report / United Solar Ovonic Corporation. – Troy (Michigan), 2005. – 130 p.

9. Wronski, C.R. Intrinsic and light induced gap states in a-Si:H materials and solar cells – effects of microstructure [Text] / C.R. Wronski [et al.] // Thin Solid Films. – 2004. – N 451–452. – P. 470–475.

10. Wyrsh, N. Electric field profile in $\mu\text{c-Si:H}$ p-i-n devices [Text] / N. Wyrsh [et al.] // Proc. of the 11th European PVSEC. – Montreux, 1992. – P. 742–747.

11. Yue, G. Metastability in Hydrogenated Nanocrystalline Silicon Solar Cells [Text] / G. Yue [et al.] // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 2006. – Vol. 910. – P. A-02-01 – A-02-12.