

УДК 621.315

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК АМОРФНОГО КРЕМНИЯ И *p-i-n* СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

А.Л. МАРГАРЯН

Ереванский государственный университет, Армения

e-mail: marhakob@ysu.am

(Поступила в редакцию 21 декабря 2013 г.)

Разработана и собрана лабораторная установка для получения тонких пленок аморфного кремния и структур на их основе методом газофазной эпитаксии. Все рабочие процессы автоматизированы с помощью программного обеспечения в среде LabVIEW. Специально созданы программы и подпрограммы для поддержания с необходимой точностью соответствующей температуры, управления регулятором потока газа, а также для контроля вакуумных клапанов. Изготовлены тонкие пленки гидрогенизированного аморфного кремния *n*-, *p*-, а также *i*-типов различной толщины и тестовая *p-i-n* структура. Исследованы спектры пропускания и фотопроводимости полученных образцов.

1. Введение

В связи с уменьшением размеров полупроводниковых элементов и повышением степени их интеграции на ведущие позиции при формировании функциональных слоев микросхем выходит технология газофазной эпитаксии (ГФЭ) [1]. Сегодня ГФЭ является самой высокоэффективной технологией в микроэлектронике не только на основе кремния и кремния на диэлектрике, но и сплавов SiGe и полупроводниковых соединений (например, AlGaAs и других A_3B_5 полупроводников), в том числе функционирующих в области высоких частот (1–100 ГГц). Даже волоконно-оптические кабели, передающие оптические компоненты коммуникационной сети, изготавливают методом ГФЭ для получения желаемого профиля показателя преломления. Оптоэлектронный материал, выращенный методом ГФЭ, имеет множество применений вне отрасли коммуникации, например, светоизлучающие диоды [2].

Одной из важных проблем современной твердотельной электроники является получение датчиков света, обладающих высокой чувствительностью в области ультрафиолетового и видимого излучений. Используемые обычно для этих целей монокристаллические широкозонные полупроводники, такие как SiC и GaP, обладают достаточно высокой стоимостью, что оправдано в прецизионных сенсорах, но неприемлемо при широкомасштабном их применении. Компромисс между стоимостью и электрофизическими параметрами может быть найден при использовании такого материала как аморфный гидрогенизированный кремний (a-Si:H), также получаемый

методом ГФЭ. Установлено, что оптическое поглощение a-Si:H в 20 раз лучше, чем в монокристаллическом кремнии, а характер оптического поглощения напоминает характеристику кристалла с прямозонной структурой, имеющего ширину запрещенной зоны 1.6–1.7 эВ [3]. К тому же в пленках a-Si:H реализуется эффект ударной ионизации, чем обусловлена их высокая фоточувствительность в области ультрафиолетового излучения [4].

Другим наиболее популярным применением ГФЭ является получение пленок искусственных алмазов, что обусловлено уникальными характеристиками алмазоподобного углерода, такими как рекордно высокая твердость, наивысший модуль упругости, наименьший коэффициент теплового расширения при комнатной температуре, оптическая прозрачность в широком спектральном диапазоне, химическая и радиационная стойкость, высокая подвижность основных носителей и т.д.

В настоящее время имеются многочисленные примеры опытно-конструкторских разработок приборов на основе алмаза, выращенного с помощью ГФЭ, например, солнечно-слепых датчиков ультрафиолетового излучения, датчиков рентгеновского, α , β , γ излучений, датчиков высокоэнергетических частиц, высоковольтных диодов Шоттки, полевых транзисторов. Следует особо подчеркнуть, что только с развитием технологии ГФЭ стало возможным массовое производство ЖК мониторов.

Сегодня метод ГФЭ используется также при получении наноматериалов, таких как фуллерены [5], углеродные нанотрубки [6] и графен [7].

В настоящее время на рынке солнечных элементов доминируют приборы на основе монокристаллического кремния, но высокая стоимость последнего приводит к быстрому развитию технологий, использующих аморфный кремний (a-Si). Помимо снижения стоимости приборов, использование a-Si приводит к уменьшению толщины солнечных элементов, их веса и расхода материалов за счет более тонких элементов и их высокого поглощения излучения Солнца. Тем не менее, эффективность солнечных элементов на основе a-Si довольно низка по сравнению с кристаллическим. Эффективность элементов на основе аморфного кремния можно повысить, используя, в частности, полупроводниковые нанокристаллы.

2. Описание установки и эксперимент

В Центре полупроводниковых приборов и нанотехнологий Ереванского государственного университета (Армения) разработана и собрана лабораторная установка для получения тонких пленок аморфного кремния и структур на их основе методом газовой фазной эпитаксии.

Схема разработанной установки приведена на рис.1. Установка состоит из трех основных частей – реактора, вакуумной системы и системы распределения газов. Реактор представляет собой вакуумную камеру, в которой расположены высокочастотные (ВЧ) электроды и подложкодержатель с нагревателем. Имеются смотровые окна и специальные патрубки для подачи и откачки технологических газов. Реактор снабжен также рубашкой водяного охлаждения. Вакуумная система состоит из форвакуумного и турбомолекулярного насосов, предназначенных для обеспечения

высокого вакуума в реакторе, а также насоса Рутса, с помощью которого осуществляется откачка отработавших газов из рабочей камеры. Система газораспределения состоит из емкостей для хранения газов с соответствующими редукторами, газовых труб, системы клапанов, газгольдеров для приготовления необходимых газовых смесей, а также двух программируемых регуляторов потока газа. Контроль над давлением аккумулированного газа осуществляется с помощью цифровых датчиков. Все рабочие процессы автоматизированы с помощью программного обеспечения в среде LabVIEW.

Контроль температуры высокочастотных электродов осуществляется с помощью специально созданной программы, обеспечивающей ШИМ (широтно-импульсная модуляция)-контроль для поддержания с необходимой точностью соответствующей температуры. Разработана подпрограмма для управления регулятором потока газа в соответствии с протоколом Flow Bus, а также создана программа контроля вакуумных клапанов (рис.1). Интерфейс позволяет устанавливать и контролировать температуру электродов, расход технологических газов, давление в газгольдере и вакуум в реакторе.

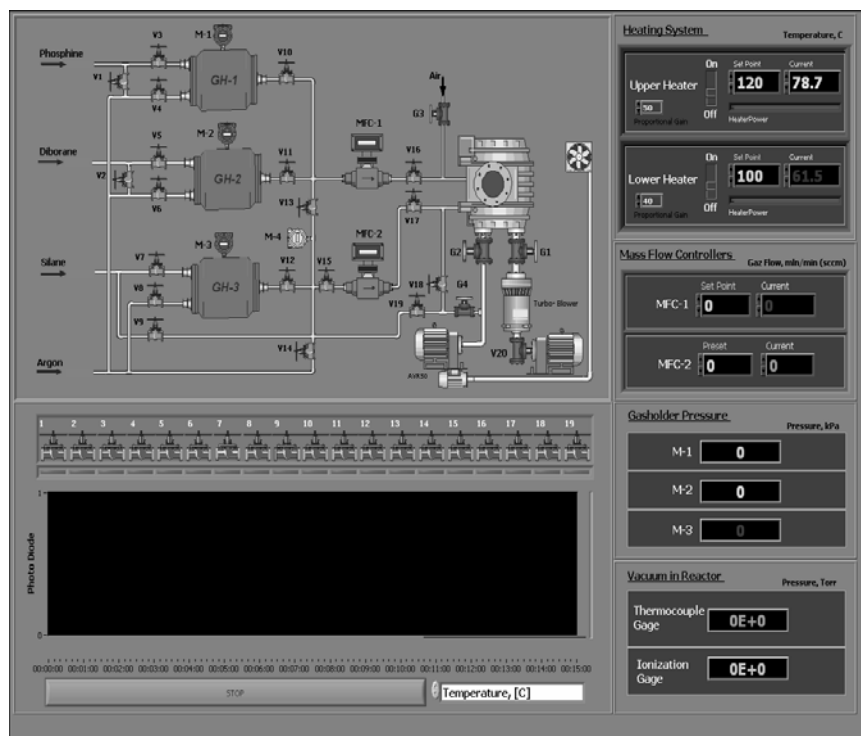


Рис.1. Схема разработанного устройства и интерфейс программного обеспечения для управления технологическим процессом.

В качестве пилотных образцов были изготовлены тонкие пленки гидрогенизированного аморфного кремния *p*-, *n*- и *i*-типов. Изготовлена также тестовая *p-i-n* структура. Нанесение пленок проводилось с использованием стандартной диодной

схемы плазмохимического осаждения из газовой фазы (PE CVD – plasma enhanced chemical vapor deposition). Высокочастотное напряжение прикладывалось к одному из электродов, а подложка находилась на втором электроде, который был заземлен. Пленки осаждались на стеклянные подложки. Для контроля толщины пленки в процессе роста использовалась методика лазерной интерферометрии при угловом падении луча на подложку.

Параметры технологического процесса следующие – давление рабочей газовой смеси в реакторе – 0.1 Торр, температура подложки – 300°C, удельная мощность высокочастотной плазмы 0.3–1 Вт/см², частота – 13.56 МГц. Для получения пленок a-Si:H использовалась 10% смесь силана в аргоне, расход рабочей смеси составлял 10 ст.см³/мин (стандартный кубический сантиметр в минуту). Для получения пленок *p*-типа в рабочую камеру из двух газгольдеров через отдельные регуляторы расхода газа подавались 1% смесь диборана (B₂H₆) в аргоне и 10% смесь силана (SiH₄). Расходы рабочих смесей составляли 1.5 ст.см³/мин и 15 ст.см³/мин, соответственно. Для получения пленок *n*-типа вместо диборана использовалась 1% смесь фосфина (PH₃) в аргоне (при тех же расходах рабочих газов).

Для тестирования изготовленной установки и опробования технологии была изготовлена пленка аморфного кремния толщиной 1200 нм и измерены спектры пропускания и фотопроводимости полученного образца. Результаты измерений приведены на рис.2.

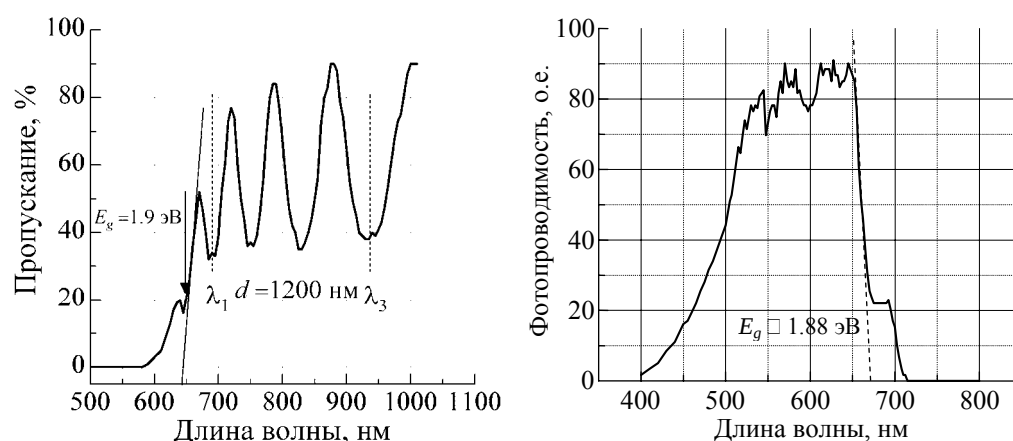


Рис.2. Спектры пропускания и фотопроводимости пленок a-Si:H.

На спектре пропускания видны характерные интерференционные осцилляции, из которых была оценена толщина пленки, согласно формуле $d = \lambda_p \lambda_q (p - q) / 2n(\lambda_p - \lambda_q)$, где n – коэффициент преломления, p и q – номера соответствующих осцилляций, λ_p и λ_q – длины волн данных осцилляций. Ширина запрещенной зоны полученной полупроводниковой пленки определялась по спаду длинноволнового края спектра фотопроводимости и составляла 1.88 эВ.

Для отработки технологического процесса были изготовлены тонкие пленки гидрогенизированного аморфного кремния *n*-, *p*-, а также *i*-типов различной толщины.

При этом все параметры технологического процесса поддерживались постоянными, изменялось только время осаждения пленок. На рис.3 приведены зависимости толщины пленок от времени осаждения. Для всех типов пленок скорость роста постоянна и при данных технологических режимах в среднем составляет 12 нм/мин.

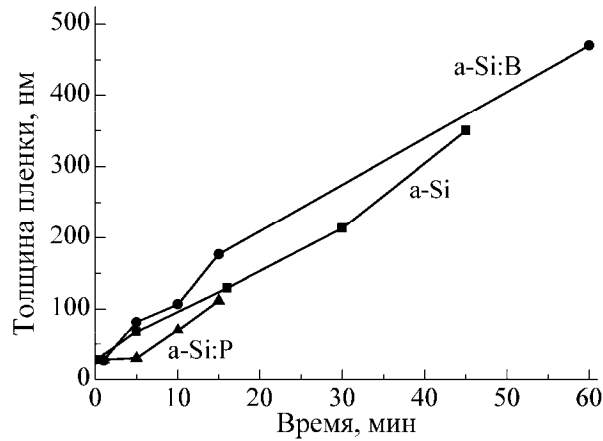


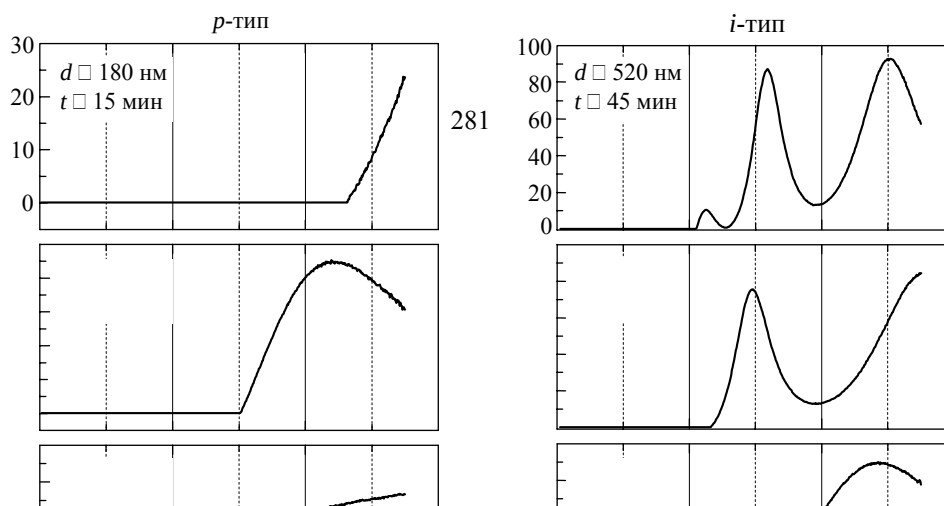
Рис.3. Зависимости толщины пленок от времени осаждения.

Тип проводимости, удельное сопротивление, а также концентрация и подвижность носителей заряда были определены с помощью стандартных методов измерения электрофизических параметров. Результаты этих измерений для всех типов пленок, выращенных в течение 10 мин, приведены в таблице.

Образец	<i>i</i> -a-Si:H	<i>p</i> -a-Si:H	<i>n</i> -a-Si:H
Концентрация неравновесных носителей заряда	10^{13}	10^{14}	10^{14}
Подвижность носителей заряда, $\text{см}^2/\text{В с}$	50	550	700
Удельное сопротивление пленки, Ом см	550	65	11

С целью определения оптимальной толщины пленок для изготовления *p-i-n* структуры были исследованы спектры пропускания *p*-, *i*-, *n*- пленок при различных толщинах (рис.4). Как следует из рисунка, пленки *p*-типа прозрачны в видимой области спектра только при малых толщинах, тогда как пленки *i*- и *n*-типов практически не поглощают видимый свет независимо от их толщины. Лишь при больших толщинах наблюдается интерференционное гашение.

С целью обеспечения оптического окна и для исключения интерференционного гашения толщина *p*- и *n*-типа пленок выбиралась минимальной (0–12 нм и 20–30 нм, соответственно).



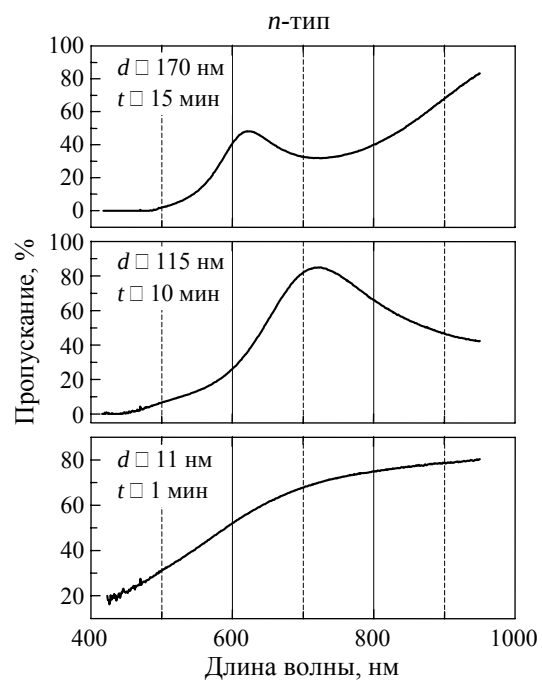


Рис.4. Спектры пропускания пленок a-Si:H *p*-, *i*-, *n*-типа при различных толщинах.

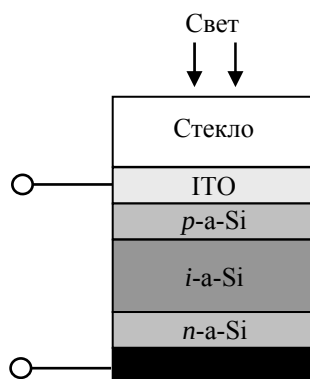


Рис.5. Схематическое изображение $p-i-n$ структуры.

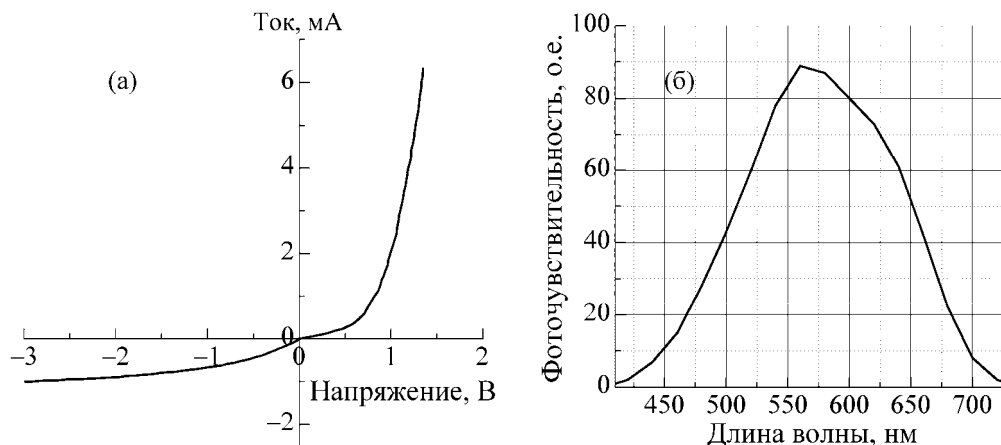


Рис.6. Вольтамперная характеристика (а) и спектральная чувствительность (б) полученной $p-i-n$ структуры.

Для обеспечения эффективного поглощения толщина i -области выбиралась на порядок больше (280–300 нм). Схематическое изображение диодной $p-i-n$ структуры приведено на рис.5. Структура осаждалась на стеклянной подложке с прозрачным токопроводящим покрытием (ИТО – оксиды индия и олова), которое служило фронтальным контактом, а для тылового контакта наносилась двухслойная Cr-Si металлизация методом термического осаждения. Были исследованы вольтамперная характеристика и спектральная чувствительность полученной структуры (рис.6а,б соответственно). Как видно из рисунков, структура имеет выпрямляющую характеристику и светочувствительность в видимой области спектра. Очевидно, что при оптимизации структурных, электрофизических и оптических параметров полученные образцы могут служить в качестве фотосенсоров в видимой области, а также преобразователей солнечной энергии. Планируется разработать технологию получения нанокристаллического кремния, алмазоподобных пленок и графена.

3. Заключение

На разработанной установке газофазной эпитаксии получены тонкие пленки аморфного кремния различных типов и многослойные полупроводниковые структуры.

Исследования спектров пропускания изготовленных тонких пленок гидрогенизированного аморфного кремния n -, p -, i -типов различной толщины показали,

что пленки *p*-типа в видимой области спектра прозрачны только при малых толщинах, тогда как пленки *i*- и *n*-типов практически не поглощают видимый свет независимо от толщины. Определена зависимость толщины пленки от времени осаждения и установлено, что скорость роста одинакова для всех типов пленок и в среднем составляет 12 нм/мин. Изготовлена также диодная *p-i-n* структура, исследованы ее вольтамперная характеристика и спектральная чувствительность.

При оптимизации структурных, электрофизических и оптических параметров полученные образцы могут служить в качестве фотосенсоров в видимой области, а также преобразователей солнечной энергии.

Данная работа выполнена в рамках проекта А-1484 Международного научно-технического центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В.Киреев, А.Столяров.** Технология микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. М., Техносфера, 2006.
2. **J.R.Creighton, P.Но.** Introduction to Chemical Vapor Deposition (CVD). ASM International, 2001.
3. **А.Меден, М.Шо.** Физика и применение аморфных полупроводников. М., Мир, 1991.
4. **В.А.Васильев, М.М.Мездрогина, Е.И. Теруков и др.** Письма в ЖТФ, **16**, 47 (1990).
5. **L.Chow, H.Wang, S.Kleckley, T.K.Daly, P.R.Buseck.** Appl. Phys. Lett., **66**, 4 (1995).
6. **S.Bhaviripudi, E.Mile, et al.** J. Am. Chem. Soc., **129**, 6 (2007).
7. **M.Bronikowski, H.Manohara.** NASA Tech Briefs, www.techbriefs.com/content/view/2992/34, 2008.

PREPARATION AND INVESTIGATION OF AMORPHOUS SILICON THIN FILMS AND *p-i-n* STRUCTURES ON THEIR BASE

H.L. MARGARYAN

A laboratory setup for preparation of amorphous silicon thin films and structures on their base by chemical vapor deposition (CVD) has been developed and assembled. All the operating processes were automated by software in LabVIEW media. Special programs and subprograms were created to maintain the corresponding temperature with a necessary accuracy, to control the gas flow controller, as well as to control the vacuum valves. Amorphous silicon thin films of *n*-, *p*- and *i*-types, as well as a test *p-i-n* structure were made. Transmission and photoconductivity spectra of the obtained samples were investigated.