



УДК 621.383.51

В. П. Афанасьев, А. В. Васильев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Спектры фотопроводимости пленок аморфного гидрогенизированного кремния с нанокристаллическими включениями

Разработана методика исследования пленок аморфного гидрогенизированного кремния с неоднородно распределенными по толщине нанокристаллическими включениями (pm-Si:H), осажденных на стеклянные подложки. Исследованы спектры фототока для пленок различной толщины при освещении со стороны свободной поверхности пленки и со стороны стеклянной подложки. Установлено наличие остаточной фотопроводимости, а также двух максимумов в спектрах фотопроводимости пленок, что, по-видимому, свидетельствует о наличии кристаллической и аморфной фаз в пленках.

pm-Si:H, спектр фототока, остаточная фотопроводимость

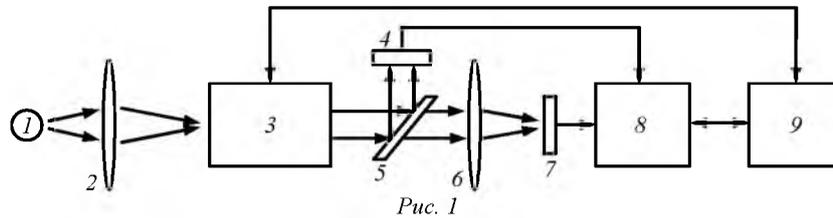
В последнее время особое внимание уделяется тонким пленкам полиморфного кремния (pm-Si:H) с нанокристаллическими включениями как перспективному материалу для солнечной энергетики. Такие пленки обладают улучшенными свойствами по стабильности и переносу заряда. В связи с этим исследование спектральных характеристик указанных пленок является актуальной задачей, которой посвящено много работ, но данные часто различаются. Это связано с тем, что исследования проводились на разных пленках, выращенных в разных технологических условиях [1]. В данной работе был предложен один из нестандартных способов анализа спектральных характеристик пленок pm-Si:H.

Объект исследования. Нелегированные пленки pm-Si:H наносились на стекло методом плазмохимического осаждения при разложении моносилана (SiH_4) в плазме высокочастотного (ВЧ) тлеющего разряда при температуре подложки 220°C [2]. Для получения пленки pm-Si:H была использована смесь моносилана с водородом. Чтобы добиться хорошей адгезии пленки на стекло, осаждение проводилось в 2 этапа. На первом этапе осаждался нижний слой при высоком разбавлении моносилана водородом: $R_{\text{H}} = [\text{H}_2]/[\text{SiH}_4] = 220$. Боль-

шое значение R_{H} приводит к увеличению объемной доли нанокристаллической фазы в структуре пленок [3]. При таком значении на стеклянной подложке образуется протокристаллический кремний (pc-Si:H) толщиной $2 \dots 3$ нм, который выступает в качестве затравки для образования нанокристаллических включений.

На втором этапе наносился слой pm-Si:H толщиной $50 \dots 300$ нм в зависимости от времени осаждения. Режимы осаждения: $R_{\text{H}} = 31$, давление в ростовой камере 240 Па, мощность, подаваемая на ВЧ-электрод, 1200 Вт. При таком способе осаждения в зависимости от значения разбавления и давления в ростовой камере получались двухфазные пленки с различным соотношением аморфной и нанокристаллической фаз. При увеличении R_{H} доля нанокристаллической фазы в пленках возрастала, а с повышением давления – уменьшалась [4]. Обнаружено, что у всех пленок со стороны подложки присутствуют кремниевые нанокристаллические включения. При разных давлениях протяженность со стороны подложки области с нанокристаллической фазой составляла от $20 \dots 30$ до $50 \dots 70$ нм. Параметры осаждения пленок приведены в таблице. Алюминиевые контакты нанесены на пленку с зазором 1 мм.

Номер образца	Поток газа, см ³ /мин		R _Н	Давление, Па	Мощность, Вт	Время нанесения, с	Толщина пленки, нм
	SiH ₄	H ₂					
1	350	11 000	31	240	1200	125	46
2						250	95
3						500	192
4						750	287



Методика исследования. Был разработан метод и аппаратный комплекс для исследования пленок рп-Si:H (рис. 1).

Установка состоит из галогенового источника мощностью 150 Вт (1), конденсорных линз (2, 6), монохроматора M266 (3), светоделителя (5), эталонного кремниевый фотодиода ФДУК-100 (4), исследуемой пленки (7), двухканального пикоамперметра Keihley 6482 (8) и компьютера (9).

Излучение от источника 1 падало на входную щель монохроматора 3. Далее оно попадало на светоделитель 5; часть отражалась на эталонный кремниевый фотодиод 4 с известной спектральной чувствительностью, а часть через линзу 6 попадала на исследуемую пленку 7. Токи эталонного фотодиода и исследуемой пленки одновременно измерялись пикоамперметром 8. Измерения производились при освещении как со стороны свободной поверхности пленки, так и со стороны стеклянной подложки.

Для автоматизации процесса, а также управления пикоамперметром и монохроматором была написана программа на LabVIEW для компьютера 9. Все измерения проводились в специально отработанном режиме, временная диаграмма которого показана на рис. 2. На первой стадии (рис. 2, 1) в течение $t = 1.5$ с при закрытой диафрагме на пленку подавалось напряжение $U = 10$ В для измерения темнового тока. На второй стадии (рис. 2, 2) диафрагма открывалась и при установленных параметрах измерялся ток под освещением при

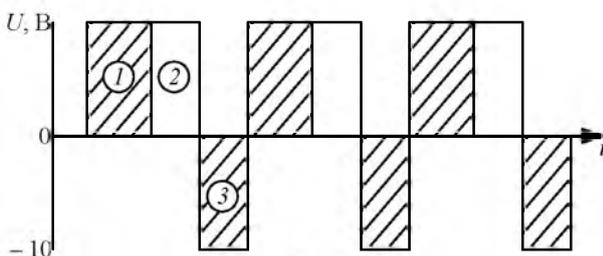


Рис. 2

выбранной длине волны. На третьей стадии (рис. 2, 3) диафрагма закрывалась, а на пленку в течение $t = 1$ с подавалось обратное напряжение $U = -10$ В для уменьшения эффекта остаточной фотопроводимости. Длительности стадий и значения напряжений обеспечивали снятие заряда с пленки [5]. Стадии повторялись для проведения измерений во всем диапазоне длин волн.

Результаты эксперимента. При исследовании спектральных характеристик пленок выявлена остаточная фотопроводимость, вызванная присутствующими в них дефектами [6]. На рис. 3 показаны нормированные спектры фототока в пленке толщиной 200 нм

$$I_{\text{ф.н}}(\lambda) = I_{\text{ф}}(\lambda) / I_{\text{ф max}}$$

для ряда значений времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$. С течением времени спектральная чувствительность в длинноволновой области растет, а в коротковолновой уменьшается. Данный эффект – эффект фотоиндуцированных изменений свойств пленок аморфного гидрированного кремния с нанокристаллическими включениями [1] – затрудняет исследование пленок. Поэтому анализ и уменьшение влияния данного фактора является актуальной задачей.

На рис. 4 показаны спектры фототока для пленок рп-Si:H различной толщины. Измерения проводились при комнатной температуре и засветке образцов

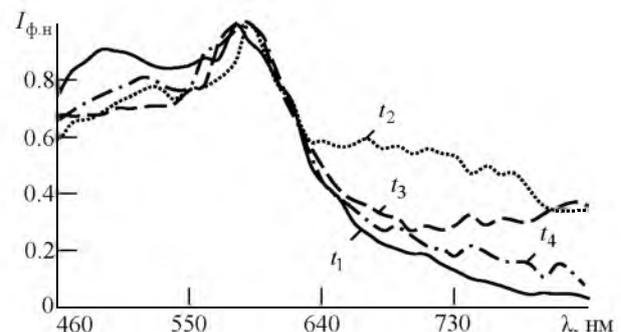


Рис. 3

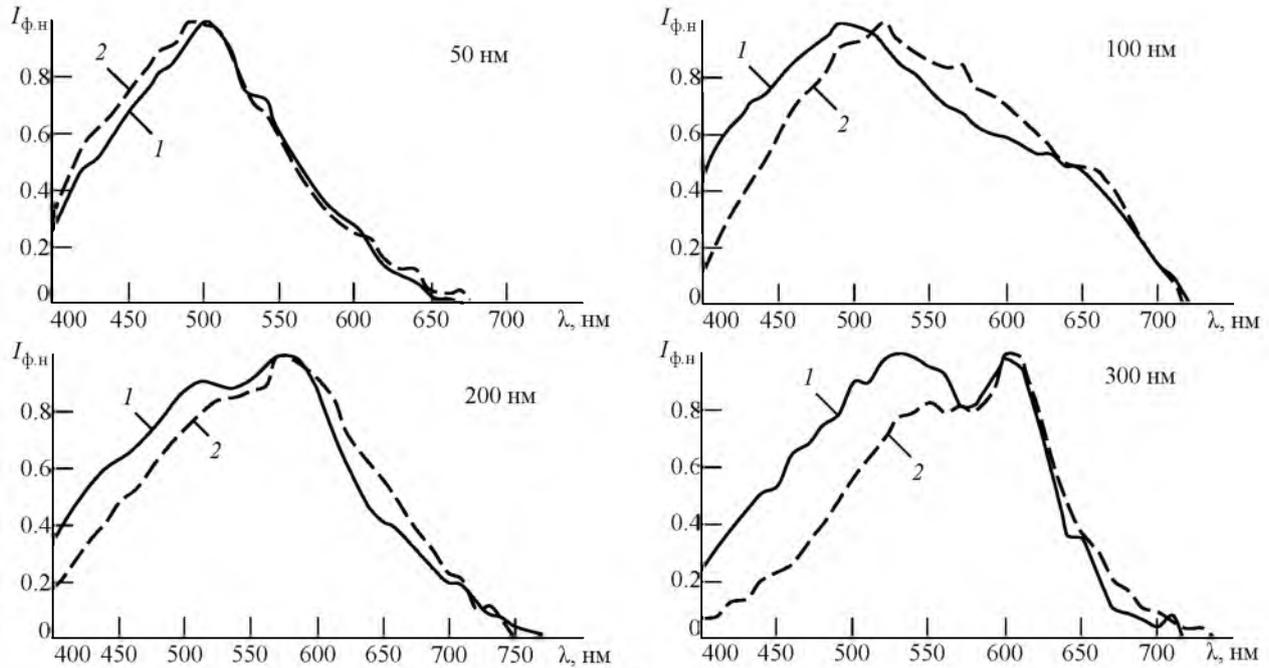


Рис. 4

со стороны пленки (кривые 1) и со стороны стеклянной подложки (кривые 2). Режимы подбирались так, чтобы добиться повторяемости экспериментов.

Анализ полученных результатов. Измерения спектров фототока проводились при освещении как со стороны пленки, так и со стороны стеклянной подложки. При измерениях было выявлено, что проведению корректного анализа мешает эффект так называемой остаточной фотопроводимости, в связи с чем была разработана рассмотренная ранее в настоящей статье методика исключения этого эффекта и получения хорошей повторяемости результатов.

Для пленки толщиной $d = 50$ мкм максимум фототока и его положение на оси длин волн ($\lambda = 500$ нм) практически не зависят от стороны освещения образца. Эффект объясняется тем, что при такой малой толщине пленка просвечивается насквозь и выявить влияние аморфной и нанокристаллической фаз невозможно. По мере увеличения толщины пленки различие положений максимумов становится все более очевидным. Для пленки толщиной $d = 100$ мкм максимум фототока при освещении со стороны пленки находится на длине волны $\lambda = 500$ нм и незначительно (на 30 нм) смещается в длинноволновую область спектра при освещении со стороны стеклянной подложки. Это объясняется тем, что пленка осаждалась в 2 этапа, и нанокристаллическая фаза в той или иной мере присутствует у всех образцов. Указанный эффект проявляется также в спектрах

фототока для пленок толщиной 200 и 300 нм: максимум фототока на длине волны $\lambda = 500$ нм соответствует аморфной фазе, а на длине волны $\lambda = 600$ нм – нанокристаллической. При этом нижний слой, осажденный на стеклянную подложку, содержит большее количество нанокристаллитов. Приведенное заключение следует из того, что при освещении образцов со стороны стеклянной подложки (рис. 4, кривые 2) максимум фототока, характеризующий аморфную фазу, уменьшался по сравнению с максимумом при освещении со стороны пленки (рис. 4, кривые 1). Напротив, значения максимума фототока, характеризующего нанокристаллическую фазу, не менялись в зависимости от стороны освещения.

В заключение необходимо отметить, что режимы получения пленок в значительной мере влияют на спектры фотопроводимости пленок. Это проявляется в наличии двух пиков в спектрах и в незначительном смещении максимумов при освещении пленки как со стороны стеклянной подложки, так и со стороны свободной поверхности пленки, что свидетельствует о наличии двух фаз в пленке. При этом ближе к подложке находится слой, содержащий большее количество нанокристаллитов, и их количество уменьшается по мере роста пленки.

Авторы выражают благодарность сотруднику ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике" А. В. Семенову за предоставленные для исследований образцы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курова И. А., Ормонт Н. Н. О фотоиндуцированных эффектах в нелегированных пленках pm-Si:H // Физика и техника полупроводников. 2013. Вып. 6. С. 757–760.
2. Фотопроводимость пленок гидрированного кремния с двухфазной структурой / А. Г. Казанский, Е. И. Теруков, П. А. Форш, J. P. Kleider // Физика и техника полупроводников. 2010. Вып. 4. С. 513–516.
3. Особенности фотоэлектрических и оптических свойств пленок аморфного гидрогенизированного кремния, полученных плазмохимическим осаждением из смеси моносилана с водородом / А. Г. Казанский, Е. И. Теруков, П. А. Форш, М. В. Хенкин // Физика и техника полупроводников. 2011. Вып. 4. С. 518–523.
4. Thin-film Silicon Solar Cells / ed. by Arvind Shah. Lausanne: EPFL Press, 2010. 430 p.
5. Фотопроводимость тонких пленок аморфного гидрированного кремния / А. Г. Казанский, О. Г. Кошелев, А. Ю. Сазонов, А. А. Хомич // Физика и техника полупроводников. 2008. Вып. 2. С. 192–194.

V. P. Afanasjev, A. V. Vasiljev

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Photoconductivity Spectra of Amorphous Hydrogenated Silicon Films with Nanocrystalline Inclusions

The technique for the study of amorphous hydrogenated silicon films with nanocrystalline inclusions non-uniformly distributed through the thickness (pm-Si:H) deposited on glass substrates is devised. Photocurrent spectra for the films of various thicknesses are studied when illuminated from the free film surface and from of the glass substrate. The presence of residual photoconductivity and two peaks in photoconductivity spectra of the films are determined that, apparently, indicates the presence of crystalline and amorphous phases in the films.

pm-Si:H , Photocurrent Spectrum, Residual Photoconductivity

Статья поступила в редакцию 19 мая 2016 г.



ВСЕРОССИЙСКАЯ ОЛИМПИАДА СТУДЕНТОВ

«РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»



Олимпиада проводится **21, 22 апреля 2017 г.** на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Информация о проведении олимпиады размещена на сайте www.eltech.ru.

К участию в олимпиаде допускаются студенты старших курсов бакалавриата и специалитета, а также студенты магистратуры по направлениям подготовки:

- 11.04.01 – «Радиотехника»;
- 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»;
- 11.04.03 – «Конструирование и технология электронных средств»;
- 11.05.01 – «Радиоэлектронные системы и комплексы»;
- 11.05.02 – «Специальные радиотехнические системы».

Участники обязаны пройти регистрацию по установленной форме на сайте университета www.eltech.ru и на интернет-сайте Всероссийских олимпиад: <http://vso-mon.ru/prisoedinitnya>.

Контактная информация:

Маругин Алексей Сергеевич – заместитель декана факультета радиотехники и телекоммуникаций, к. т. н, доцент.

E-mail: ASM_ETU@mail.ru