

# ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.016

## ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ РАССЕЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ НА ГРАНИЦЕ СТЕКЛА

© 2014 г. В. В. Стаценко, аспирант; В. Д. Петриков

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: v.statcenko@gmail.com

Проведены исследование и сравнение оптических свойств шероховатых поверхностей стекла, полученных различными методами. Показано, что при создании шероховатой поверхности с помощью шлифовальных порошков размером зерна от 10 до 40 мкм ширина диаграммы рассеяния увеличивается до  $35^\circ$ , но при этом за счет внутренних отражений снижается количество пропускаемого излучения. Отмечено, что создание шероховатой поверхности с помощью травления обеспечивает более узкие диаграммы рассеяния, но снижает потери прошедшего излучения.

*Ключевые слова:* диаграмма рассеяния, шлифовка.

Коды OCIS: 290.5880

Поступила в редакцию 04.10.2013

### Введение

Проблема формирования диаграммы рассеяния светового излучения существует достаточно давно. Формирование так называемой Ламбертовской диаграммы легко обеспечивается средами с объемными рассеивателями (молочные стекла). Однако во многих случаях, в частности, при изготовлении фоточувствительных элементов солнечной энергетики и для повышения эффективности использования мощных светодиодов возникает задача формирования заданной диаграммы рассеяния [1, 2]. В случае фоточувствительных элементов оптимизация светорассеяния на границе стекло – аморфный (или поликристаллический) кремний позволяет увеличить долю светового излучения, поглощаемого в тонком слое светочувствительного полупроводника (в случае аморфного кремния – приблизительно 0,2 мкм), и повысить коэффициент полезного действия элемента [3].

В качестве одного из подходов к формированию требуемой диаграммы светорассеяния сейчас рассматривается использование шероховатой границы стекло – полупроводник [3]. Для получения шероховатостей высотой порядка 0,2–0,5 мкм было предложено использовать

различные типы структурирования поверхности стекла, на которую наносятся прозрачный электрод и слой полупроводника [4–6]. Альтернативой структурированию поверхности стекла является структурирование поверхности прозрачного электрода из оксида цинка [7].

В настоящей работе представлены результаты исследования рассеяния света на поверхности стекла с различной шероховатостью.

### 1. Экспериментальная часть

В качестве экспериментальных образцов в работе были использованы стекла фирмы *Oerlikon*, которые применяются при производстве тонкопленочных солнечных элементов на основе аморфного и микрокристаллического кремния [8]. Шероховатость поверхности образцов обеспечивалась длительной шлифовкой с использованием стандартных шлифовальных порошков и химическим травлением, образцы сравнивались со стандартно используемыми в солнечных элементах стеклами со структурированной пленкой оксида цинка [7]. Сводка исследованных образцов представлена в таблице.

Подготовленные образцы исследовались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ)

(AFM Solver Pro), абсорбционной спектроскопии (спектрофотометр *Specord 50*), также измерялась диаграмма рассеяния прошедшего через образцы излучения гелий-неонового лазера с длиной волны 0,63 мкм при падении света со стороны гладкой поверхности стекла (для калибровки измерительной установки использовалась измеренная Ламбертовская диаграмма рассеяния молочного стекла). Результаты измерений представлены на рис. 1–4.

## 2. Обсуждение результатов

На основе измерений методом АСМ были определены характерные параметры шероховатости

исследованных образцов (таблица). Как и следовало ожидать, переход от шлифовки мелким порошком к шлифовке более крупным порошком ведет к увеличению средней высоты шероховатости поверхности образцов с 0,5 до 2,5 мкм (рис. 1). Также при увеличении размера зерна порошка падает измеряемое спектрофотометром прямое пропускание (см. рис. 2). В то же время результаты измерений полного пропускания, полученные с интегрирующей сферой (см. рис. 3), свидетельствуют о том, что внутреннее поглощение образцов отличается незначительно, и на образцах, шлифованных порошками с более крупным зерном, увеличивается светорассеяние.

Исследованные образцы

Обработка образца	M10	M28	M40	HF	ZnO
Методика получения	Шлифовка порошком с размером зерна 10 мкм	Шлифовка порошком с размером зерна 28 мкм	Шлифовка порошком с размером зерна 40 мкм	Травление в 30% растворе HF в течение 10 мин	Химическое осаждение диэтилцинка
Среднее значение неоднородности, мкм	0,5–0,8	1,5–2	2,5–3	0,1–0,7	0,07–0,1

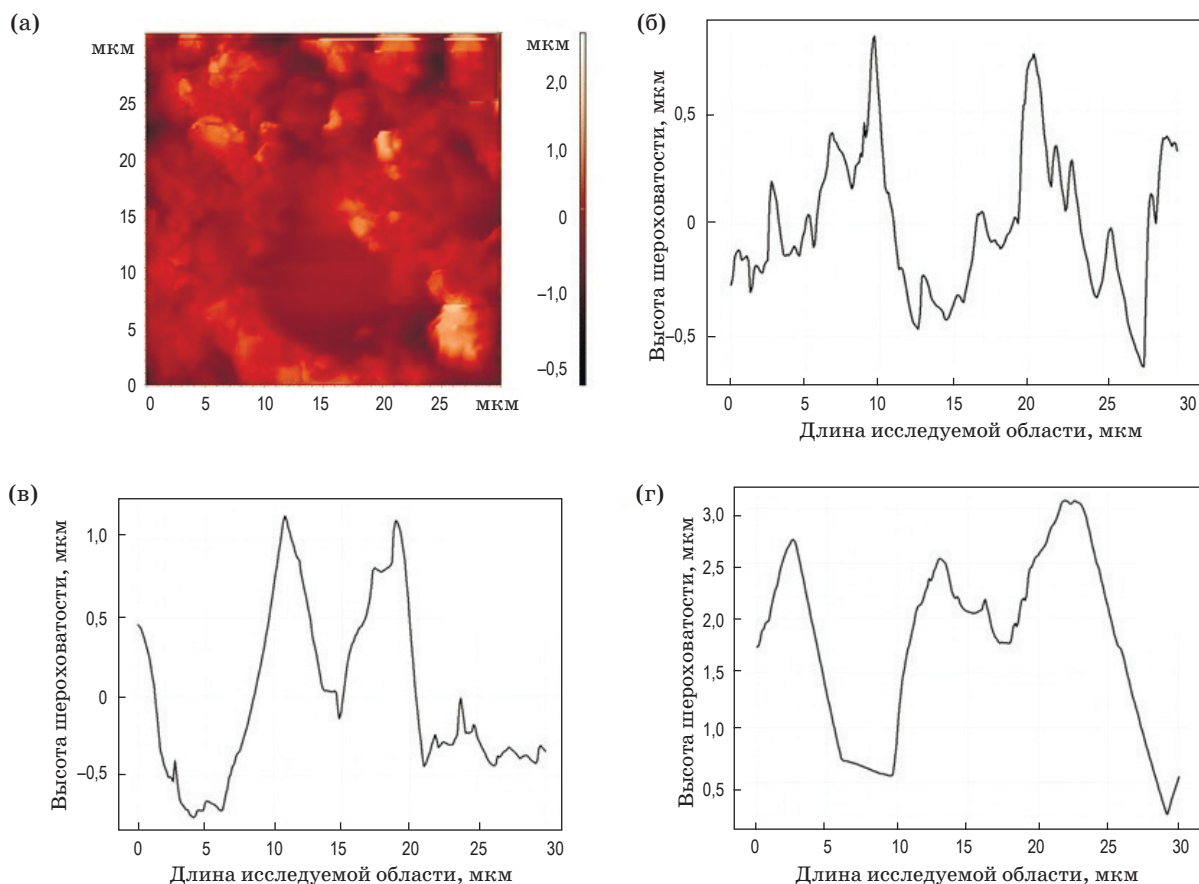


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности образца M10 (а) и полученные методом АСМ профили поверхности образцов M10 (б), M28 (в) и M40 (г).

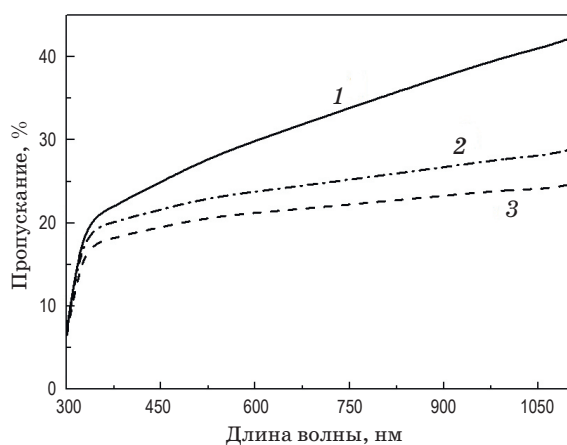


Рис. 2. Спектр прямого пропускания света образцами с обработкой M10 (1), M28 (2) и M40 (3).

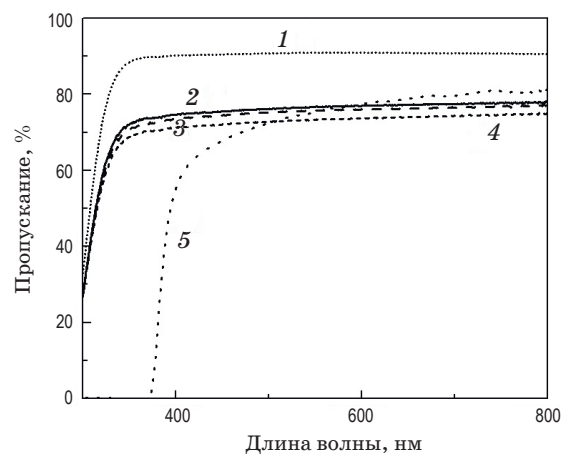


Рис. 3. Полное пропускание света образцами, обработанными HF (1), M10 (2), M28 (3), M40 (4) и ZnO (5), измеренное с интегрирующей сферой.

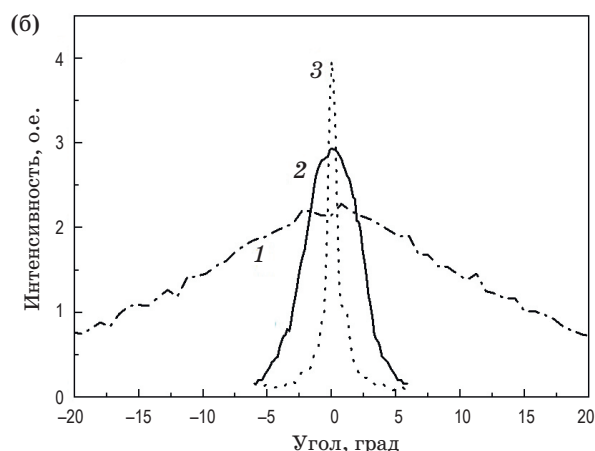
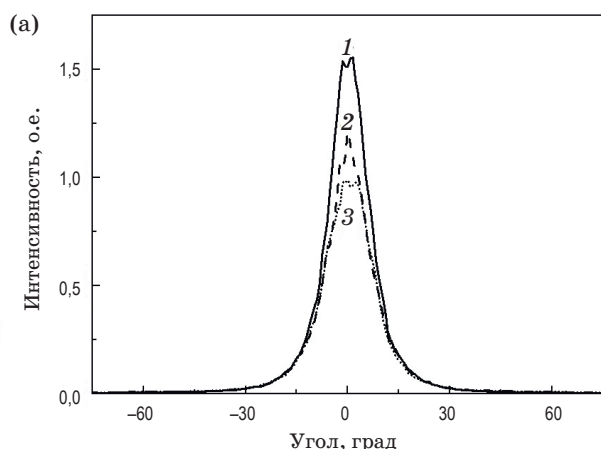


Рис. 4. Диаграммы рассеяния образцов шлифованного порошками M10 (1), M28 (2) и M40 (3) (а) стекла и сравнение диаграммы образца M10 (1) с диаграммами образцов, обработанных HF (2) и ZnO (3) (б).

Результаты измерений диаграммы рассеяния, т.е. зависимости интенсивности рассеянного света от угла (рис. 4а), показывают, что шлифовка стекол использованными в экспериментах порошками обеспечивает практически совпадающие угловые зависимости интенсивности рассеянного света, но общая интенсивность прошедшего света выше для образцов, обработанных порошком с меньшим размером зерна. На основе этого можно сделать вывод о том, что образцы, шлифованные более крупным порошком, характеризуются более высоким рассеянием в полусфере, обращенную назад по отношению к направлению луча лазера. Совпадение диаграмм рассеяния образцов 1–3 (таблица) позволяет предположить, что ответственные за рассеяние “вперед” элементы профиля рассеивателей, образующиеся на поверхности

стекла при шлифовке порошками M10, M28 и M40, имеют близкую форму, и при шлифовке более мелкими порошками удельная доля этих элементов увеличивается.

Сравнение углового распределения рассеянного света промышленного образца с пленкой оксида цинка, образца, обработанного в плавиковой кислоте, и образца, шлифованного порошком M10, представленное на рис. 4б, иллюстрирует возможности изменения диаграммы рассеяния.

## Выводы

Шлифовка стекол позволяет получить диаграммы рассеяния, отличающиеся от Ламбертовской, но в то же время достаточно широкие (до  $35^\circ$ ). При этом размер зерна порошка,

используемого для шлифовки стекла при его варьировании в диапазоне от 10 до 40 мкм практически не влияет на ширину диаграммы рассеяния несмотря на отличие средней высоты шероховатости поверхности. От размера зерна шлифовального порошка зависит только полная интенсивность прохождения и внутреннее отражение. Использованный режим химического травления образцов стекла обеспечивает расширение диаграммы рассеяния по сравнению с образцами, на которые нанесен оксид цинка. При этом, как показали спек-

тральные измерения, спектр пропускания таких образцов практически идентичен спектру пропускания чистого стекла. Таким образом, представляется перспективным поиск режимов травления и травителей, которые позволили бы получить более широкую диаграмму рассеяния при меньших потерях на рассеяние назад и внутреннее поглощение по сравнению со шлифованными образцами.

Авторы благодарят доктора физ.-мат. наук Е.И. Терукова за предоставленные образцы стекол фирмы *Oerlikon*.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асланов Э., Досколович Л.Л. Тонкий коллиматор для светодиодов // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36. № 1. С. 96–101.
2. *Arvind Shah*. Thin-film silicon solar cells. Italy: EPFL Press, 2010. 430 p.
3. *Krc J., Zeman M., Kluth O., Smole F., Topic M.* Effect of surface roughness of ZnO:Al films on light scattering in hydrogenated amorphous silicon solar cells // *Thin Solar Films*. 2003. V. 426. P. 296–304.
4. *Ren J., Ganapathysubramanian B., Sundararajan S.* Experimental analysis of the surface roughness evolution of etched glass for micro/nanofluidic devices // *J. Micromech. and Microeng.* 2011. V. 21. № 2. 025012. 7 pp.
5. *Pápa Z., Budai J., Farkas B., Toth Z.* Investigation of surface roughness on etched glass surfaces // *Thin Solar films*. 2011. V. 519. P. 2903–2906.
6. *Fouckhardt H., Hein E., Fox D., Jaax M.* Multitude of glass surface roughness morphologies as a tool box for dosed optical scattering // *Appl. Opt.* 2010. V. 49. № 8. P. 1364–1372.
7. *Kurdzesau F.V.* Preparation of ZnO:B films with different optical haze and their influence on a-Si:H /  $\mu$ c-Si:H layers formation and light trapping in thin film silicon solar cells // *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 2011. № 4 (9). P. 45–50.
8. <http://www.oerlikon.com>