

Оптические и структурные свойства композитных слоев Si: Au, полученных лазерным электродиспергированием

© О.С. Кен, В.С. Левицкий, Д.А. Явсин, С.А. Гуревич, В.Ю. Давыдов, О.М. Сресели

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: olga.sreseli@mail.ioffe.ru

(Получена 17 сентября 2015 г. Принята к печати 25 сентября 2015 г.)

Исследованы композитные слои Si–Au, полученные методом лазерного электродиспергирования с различными соотношениями Si: Au. Исследована микроскопическая структура слоев, измерены спектры комбинационного рассеяния света, оптического пропускания и отражения слоев. Показано, что распыление двухкомпонентной мишени Si–Au сильно изменяет морфологию слоев. С увеличением содержания золота в мишени слои становятся неоднородными, появляется большое количество включений, содержащих нанокристаллы кремния и некоторое количество золота. Включения при распылении двухкомпонентной мишени, скорее всего, образуются из больших расплавленных капель, вылетевших из мишени и не успевших разделиться до нанометровых размеров. Нанокристаллическая структура включений объяснена медленным и неоднородным процессом охлаждения частиц на подложке. Сделан вывод, что изменения спектров и фоточувствительности гетероструктур с исследованными слоями вызваны образованием включений, содержащих нанокристаллы кремния с добавлением золота.

1. Введение

Одной из задач современной оптоэлектроники является поиск новых материалов для фотодиодов и солнечных элементов, увеличение квантового выхода этих приборов и управление полосой их чувствительности, главным образом путем кардинального изменения физических свойств материала благодаря переходу к низкоразмерным структурам. Весьма перспективными в этом отношении являются композитные слои, состоящие из полупроводниковых и металлических наночастиц. Известно, что в кремниевых наночастицах скорость оптических переходов выше, чем в объемном кремнии, а край оптического поглощения смещен в коротковолновую область и его положение зависит от размеров наночастиц [1]. Использование кремниевых наночастиц предоставляет широкие возможности для расширения полосы поглощения света и, следовательно, спектра чувствительности кремниевых фотодетекторов и солнечных элементов [2]. В свою очередь возбуждение локализованных поверхностных плазмонов в металлических наночастицах, тем или иным образом встроенных в структуру солнечного элемента, может приводить к значительному увеличению поглощения света в нем и, следовательно, к усилению фототока [3]. В зависимости от размера металлических частиц, места их расположения в солнечном элементе, а также диэлектрической проницаемости окружающего их материала рост поглощения света может происходить за счет увеличения рассеяния света в объеме солнечного элемента или за счет локализации и усиления электромагнитного поля вблизи поверхности металлической наночастицы.

В данной работе мы исследовали композитные слои Si–Au, полученные методом лазерного электродиспергирования [4] с различными соотношениями Si: Au. Известно, что данный метод позволяет получать слои

аморфных некоагулированных металлических или полупроводниковых наночастиц с малой дисперсией размеров [5,6]. Метод основан на лазерном распылении кремниевой мишени под воздействием излучения импульсного инфракрасного (ИК) лазера; выплескивающиеся с поверхности мишени капли расплавленного материала заряжаются в плазме лазерного факела до порога неустойчивости и делятся вплоть до образования наночастиц.

Были изучены фотоэлектрические свойства гетероструктур, представляющих собой описанные выше композитные слои Si–Au на подложках монокристаллического кремния, в зависимости от количества золота в кремниевой мишени (γ) [7]. Было получено увеличение квантовой эффективности фототока в коротковолновой области спектра тем большее, чем больше золота в композитном слое. Резкое увеличение фоточувствительности до значений, превышающих 1 А/Вт, было обнаружено при $\gamma = 50\%$. При этом квантовая эффективность превышала единицу в широкой спектральной области от 400 до 1000 нм. Для создания модели, объясняющей полученный эффект, необходимо было исследовать состав и структуру слоев, а также выявить отличия слоев с $\gamma = 50\%$ от слоев остальных составов.

Данная работа посвящена исследованию структурных и оптических свойств полученных методом лазерного электродиспергирования композитных слоев Si–Au в зависимости от их состава. Исследована микроскопическая структура слоев, измерены спектры комбинационного рассеяния света (КРС), спектры оптического пропускания и отражения слоев.

2. Методика эксперимента

Тонкие композитные слои Si–Au разного состава были изготовлены методом лазерного электродиспер-

Таблица 1. Параметры образцов композитных слоев Si–Au

Номер образца	γ , %	Подложка	Толщина слоя, нм
1a	0	Сапфир	20
1b		Кварц	~ 20
1c		Кремний	~ 110
2b	8	Кварц	~ 20
2c		Кремний	100
3b	35	Кварц	~ 20
3c		Кремний	120–150
4a	50	Сапфир	20
4b		Кварц	~ 15
4b'			20–30
4c		Кремний	20–30
5b	~ 80	Кварц	120–130
5c		Кремний	120–130
6b	100	Кварц	18
6c		Кремний	18–20

гирования (ЛЭД) в вакууме, при этом использовались составные двухкомпонентные мишени Si/Au с различным содержанием Au $\gamma = S_{Au}/(S_{Au} + S_{Si})$, где $S_{Au, Si}$ — площади золотой и кремниевой частей мишени соответственно.

В данной работе были изготовлены слои с $\gamma = 0, 8, 35, 50, 80$ и 100% . Время напыления слоев составляло от 6 до 30 мин, при этом толщины изготовленных слоев определялись по результатам калибровочных напылений. Были изготовлены три серии образцов: *a* — композитные слои, полученные на сапфировых подложках; *b* — композитные слои, полученные на кварцевых подложках; *c* — композитные слои, полученные на кремниевых подложках (100) *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 1–4$ Ом · см. В табл. 1 приведены параметры исследованных образцов.

Спектры КРС регистрировались в геометрии обратного рассеяния при комнатной температуре на спектрометре LabRamHR800, совмещенном с конфокальным микроскопом (производство фирмы Jobin-Yvon Horiba). В качестве источника возбуждения использовались вторая гармоника Nd:YAG-лазера (длина волны излучения 532 нм). Лазерный луч фокусировался в пятно диаметром $\sim (1–2)$ мкм на поверхности образца. Типичная плотность мощности не превышала 2.5 кВт/см², чтобы избежать влияния лазерного воздействия на структуру исследуемых объектов.

Были измерены спектры оптического пропускания и зеркального отражения образцов серии *b*. Измерения проводились с помощью спектрометра Varian Cary 5000 UV–Vis–IR в диапазоне длин волн 200–2000 нм при комнатной температуре. Спектры зеркального отражения измерялись при угле падения, равном 7° . По измеренным спектрам пропускания и зеркального отражения

были рассчитаны суммарные спектры поглощения и диффузного рассеяния. Для некоторых образцов на этом же спектрометре с помощью интегрирующей сферы были измерены спектры диффузного отражения.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Морфология композитных слоев

Исследование скорости напыления слоев методом ЛЭД показали, что при использовании однокомпонентной золотой или кремниевой мишени толщина слоя линейно растет со временем распыления. При распылении составной мишени Si/Au с $\gamma = 50\%$ было обнаружено значительное замедление скорости роста слоя. Так, при напылении в течение 30 мин толщина такого композитного слоя Si–Au оказалась равной всего ~ 30 нм, в то время как при $\gamma = 0$ и 100% толщины чистых слоев Si и Au составили 110 и 60 нм соответственно. Объяснить подобное поведение позволило исследование морфологии слоев, изготовленных при различных γ .

Ранее было показано, что при распылении методом ЛЭД однокомпонентной полупроводниковой или металлической мишени на подложку наносится слой, состоящий в основном из аморфных наночастиц соответствующего материала с достаточно узкой дисперсией размеров. При распылении мишеней Si и Au ($\gamma = 0$ и 100% соответственно) размеры наночастиц составляют ~ 2 нм [5,6]. Кроме того, при $\gamma = 0\%$ в слоях наночастиц Si было выявлено наличие очень редких включений размерами от нескольких десятых до десятка мкм. Поверхностная концентрация таких включений невелика (рис. 1, *a*). Включения, вероятнее всего, образуются из больших расплавленных капель, вылетевших из мишени и не успевших разделиться до нанометровых размеров.

При распылении составных мишеней Si/Au морфология получаемых композитных слоев заметно отличается от морфологии слоев, полученных при $\gamma = 0$ и 100% : поверхностная концентрация микроскопических включений в композитных слоях оказалась заметно больше (рис. 1). При этом для композитных слоев любого состава количество включений возрастает с увеличением времени напыления слоя (ср. рис. 1, *e* и *f*). Появление возрастающего количества вылетевших из мишени больших расплавленных капель, образующих включения на поверхности подложки, может объясняться образованием сплава Si и Au с более низкой температурой плавления, чем у кремния.

3.2. Спектроскопия комбинационного рассеяния света

Для образцов всех составов были получены спектры КРС как от включений различного размера, так и от гладкой пленки между ними.

На рис. 2 приведен спектр КРС образца 1a, изготовленного при $\gamma = 0\%$ и представляющего собой слой толщиной ~ 20 нм на сапфировой подложке.

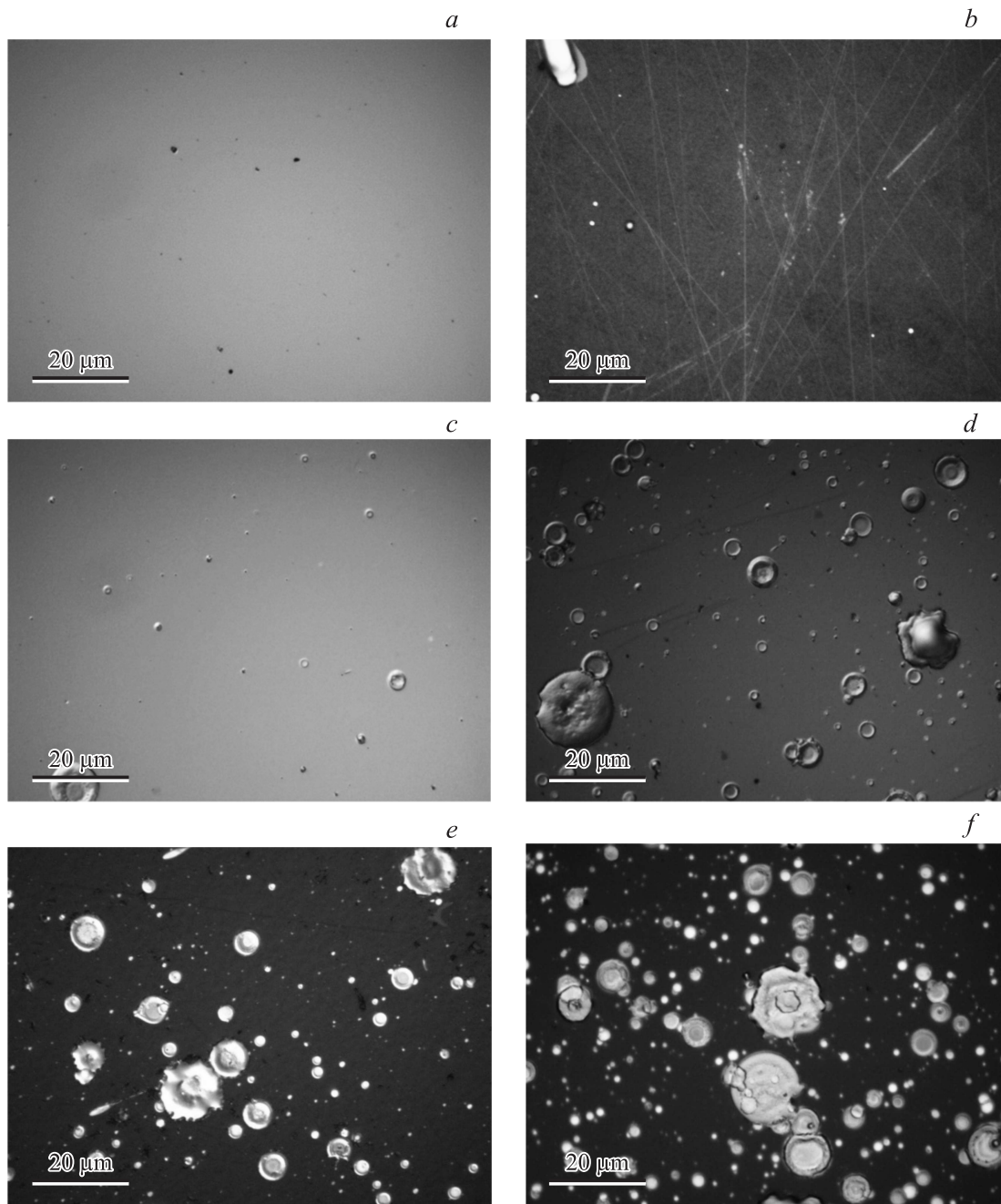


Рис. 1. Микрофотографии образцов: *a* — 1b ($\gamma = 0\%$); *b* — 6с ($\gamma = 100\%$); *c* — 2b ($\gamma = 8\%$); *d* — 3b ($\gamma = 35\%$); *e* — 4b ($\gamma = 50\%$), время распыления 12 мин; *f* — 4b' ($\gamma = 50\%$), время распыления 30 мин.

Спектр КРС образца 1a представлен широкими полосами с максимумами вблизи $150, 310, 400$ и 480 см^{-1} . Появление таких широких полос в спектрах КРС связывают с нарушением дальнего порядка (трансляционной симметрии) кристаллической решетки, что приводит к снятию запрета, накладываемого законом сохранения квазиимпульса ($q = 0$). Как следствие, фононы с любыми волновыми векторами q разрешены в спектрах КРС, которые в итоге воспроизводят плотность колебательных состояний кристаллической решетки исследуемого материала.

На рис. 2 также представлены результаты моделирования спектра КРС с использованием составляющих, пропорциональных плотности колебательных состояний ТА, LA, LO и ТО кристаллического кремния. Полосы с максимумами вблизи частот $\omega_{\text{ТА}} = 150 \text{ см}^{-1}$ и $\omega_{\text{ЛА}} = 310 \text{ см}^{-1}$ связывают с областью дисперсии поперечной (ТА) и продольной (ЛА) акустических фононных мод кристаллического кремния [8–10]. Полосы с максимумами вблизи частот $\omega_{\text{ЛО}} = 400 \text{ см}^{-1}$ и $\omega_{\text{ТО}} = 480 \text{ см}^{-1}$ соответствуют области дисперсии продольной (ЛО) и поперечной (ТО) оптических фононных мод [11–14].

Таблица 2. Результаты моделирования спектра КРС образца 1а (рис. 2)

Спектральное положение максимума полосы, см^{-1}	TA	158
	LA	297
	LO	395
	TO	479
Ширина полосы на полувывсоте, см^{-1}	TA	72
	LA	79
	LO	112
	TO	79
$I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$		0.51
$I_{\text{LA}}/I_{\text{TO}}$		0.19
$\Delta\theta, ^\circ$		9.18

В табл. 2 приведены результаты моделирования. Анализ результатов, представленных в табл. 2, выполнен подобно тому, как это сделано для аморфного кремния в работах [11,12] и [15,16].

Выполненные в работах [15,16] модельные расчеты показали, что ширина полосы ТО-фонона и положение ее максимума в спектре КРС аморфного кремния отражают степень ближнего порядка материала. Было установлено также, что отношение интегральных интенсивностей полос ТА- и ТО-фононов, $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$, коррелирует с изменениями в среднем порядке, а отношение интегральных интенсивностей полос LA- и ТО-фононов, $I_{\text{LA}}/I_{\text{TO}}$, связано с величиной структурных дефектов и напряжений. Как было показано в работах [11,12] и [15,16], для описания особенностей структурных характеристик материалов наиболее информативным является анализ полосы ТО-фонона. Так, например, среднеквадратичное отклонение угла между валентными связями кремния ($\Delta\theta$) может быть оценено из полуширины полосы ТО-фонона Γ по формуле $\Gamma/2 = 3.3\Delta\theta + 9.2$ [12].

По сравнению с результатами моделирования спектра аморфного гидрогенизированного кремния ($\Delta\theta \approx 9.5^\circ$ [17]) для образца 1а это значение немного ниже ($\Delta\theta \approx 9.18^\circ$), что указывает на меньшую степень разупорядочения структуры изучаемого материала. Анализ представленных в таблице отношений $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$ и $I_{\text{LA}}/I_{\text{TO}}$ также выявляет некоторые различия в структуре образца 1а по сравнению с аморфным гидрогенизированным кремнием [17]. Так, например, отношение интегральных интенсивностей $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}} = 0.51$ оказывается меньше в образце 1а, чем в $\alpha\text{-Si:H}$, для которого $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}} \approx 0.57$, что указывает на существенное различие среднего порядка в структуре материалов. Уменьшение отношения $I_{\text{LA}}/I_{\text{TO}}$ с 0.26 для образца аморфного кремния до 0.19 для образца 1а может указывать на различие в количестве структурных дефектов и напряжений.

Суммируя результаты анализа спектров КРС образца 1а, можно утверждать, что структурные характеристики аморфного кремния, полученного методом лазерного электродиспергирования, значительно отлича-

ются от таковых для аморфного гидрогенизированного кремния, полученного методом плазмохимического осаждения.

Исследование спектров КРС от многочисленных крупных включений на поверхности композитных слоев, изготовленных при $0 < \gamma < 100\%$, а также от немногочисленных крупных включений на поверхности образца 1а (см. рис. 1) показало, что такие спектры очень близки к спектру КРС монокристаллического кремния. В качестве примера рассмотрим типичные спектры КРС, полученные от крупных включений на поверхности образца 4а (рис. 3). Существует небольшое количество включений, спектры КРС которых идентичны спектрам объемного монокристаллического кремния (рис. 3, кривая 2), в котором одиночная линия с положением максимума на частоте 520.7 см^{-1} соответствует трижды вырожденному оптическому колебанию симметрии F_{2g} , разрешенному в спектре первого порядка этого материала. При этом

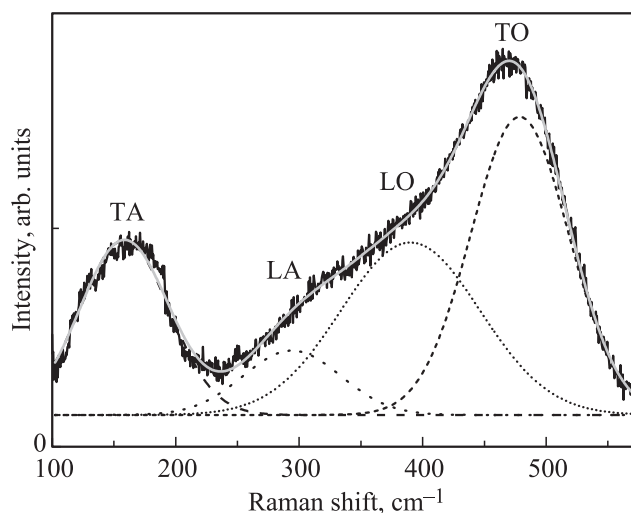
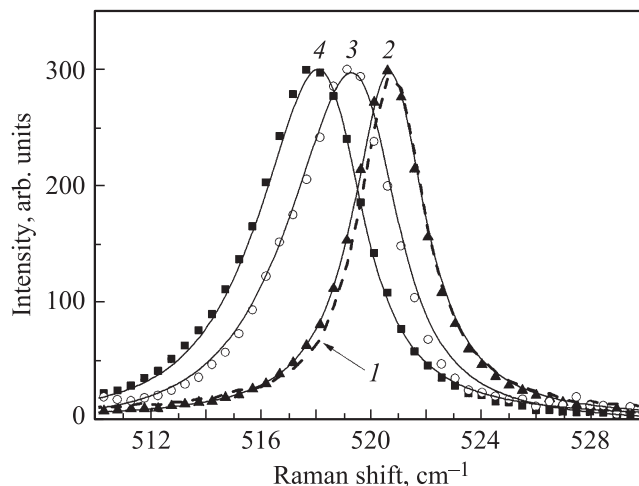
**Рис. 2.** Спектр КРС образца 1а.**Рис. 3.** Спектр КРС монокристаллического кремния (1) и типичные спектры крупных включений (2–4) на поверхности образца 4а (точки) и результаты их моделирования (сплошные линии 2–4).

Таблица 3. Результаты моделирования спектров КРС (рис. 3)

Спектральное положение максимума, см^{-1}	Ширина линии, см^{-1}	Диаметр кристалла, нм
518.5	5	7
519	4.5	8
519	4	9

полуширина этой фоновой линии ($\sim 3 \text{ см}^{-1}$) свидетельствует о высоком структурном совершенстве таких включений.

В то же время в большинстве спектров положение максимума линии кремния сдвинуто в низкочастотную сторону по отношению к ее положению в спектре объемного кристаллического кремния, а контур линии уширен (рис. 3, кривые 3 и 4). Авторами работы [18] было показано, что при размерах кристаллов кремния $< 30 \text{ нм}$ наблюдаются сдвиг в низкочастотную область и асимметричное уширение линии F_{2g} в спектрах КРС. В таких нанообъектах нарушаются правила отбора волновых векторов фононов в связи с конечными размерами нанокристаллов, что позволяет вносить вклад в спектр КРС не только фононам, лежащим вблизи центра зоны Бриллюэна ($q = 0$), но и фононам с большими волновыми векторами.

В рамках модели фононного конфинмента, в приближении сферической формы нанокристаллов [18,19] было проведено моделирование спектров КРС (см. рис. 3, кривые 3 и 4) с целью оценки размеров нанокристаллов кремния. В табл. 3 приведены результаты моделирования спектров КРС. Можно отметить, что хорошее согласие экспериментальных данных и результатов моделирования свидетельствует в пользу малой дисперсии наночастиц по размерам.

Результаты проведенного анализа показали, что более 90% крупных включений, находящихся на поверхности образца 4а, состоят из нанокристаллов кремния со средним диаметром $\sim (7-9) \text{ нм}$ и меньше. Полученные результаты справедливы для всех образцов с $0 < \gamma < 100\%$. Для крупных включений на поверхности образцов с $\gamma = 0$ характерны спектры, идентичные спектрам монокристаллического кремния. Важно отметить, что во всех спектрах, полученных от крупных включений, практически отсутствует сигнал КРС от аморфной фазы.

Наравне с крупными включениями на поверхности образца 4а существуют также и мелкие включения. Результаты анализа их спектров КРС указывают на то, что они представляют собой либо аморфную фазу, либо смесь аморфной фазы с нанокристаллами кремния. Спектры КРС таких включений представлены на рис. 4.

Следует отметить, что спектры КРС, полученные от мелких включений, находящихся на поверхности образца 4а, которые содержат только аморфную фазу, абсолютно идентичны спектрам, полученным со свободной от включений поверхности образца 1а.

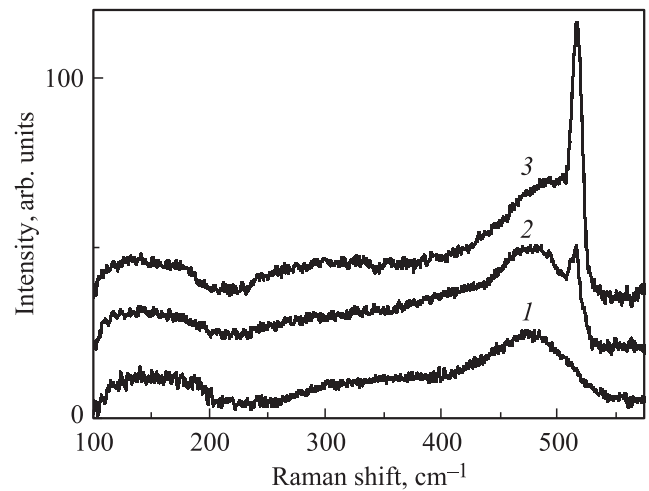


Рис. 4. Спектры КРС образца 4а, полученные от мелких включений: 1 — состоящих только из аморфной фазы; 2 и 3 — состоящих из смеси аморфной фазы и нанокристаллов.

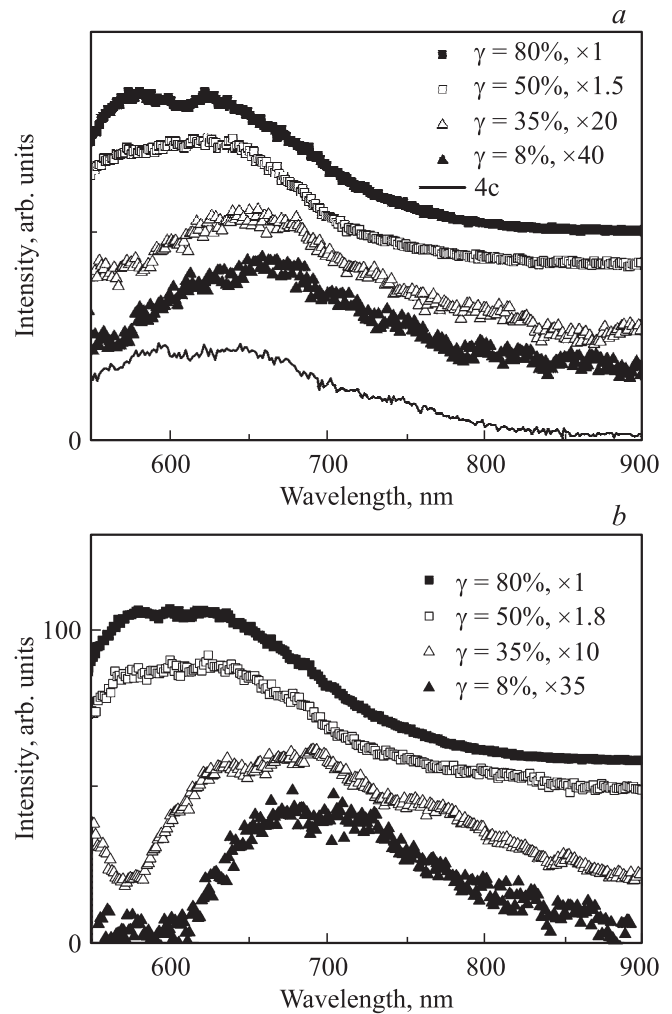


Рис. 5. Спектры КРС в широком диапазоне длин волн образцов на кремниевых (а) и кварцевых (б) подложках, полученные на свободной от включений пленке. Сплошная линия — спектр образца 4с, полученный от крупного включения. Температура измерений 300 К.

Результаты исследования мелких включений на всех образцах с $0 < \gamma < 100\%$ аналогичны полученным для образца 4а.

Кроме того, для всех образцов были проведены измерения спектров рассеяния света в более широком спектральном диапазоне, от 600 до 7700 см^{-1} (от 550 до 900 нм).

На рис. 5, *a, b* представлены спектры, полученные на свободной от включений поверхности образцов с различными γ на кремниевых и кварцевых подложках соответственно. Для удобства их анализа все спектры нормированы на максимум интенсивности и сдвинуты по вертикальной оси. В спектрах, полученных в этом диапазоне, были обнаружены широкие полосы.

Было обнаружено, что при уменьшении содержания золота в составе распыляемой мишени положение максимума полосы рассеяния сдвигается в красную область, а ее интенсивность уменьшается. Поскольку эти полосы не наблюдаются ни в спектрах использованных подложек, ни в слоях аморфного нанокремния (образцы 1b и 1c), можно предположить, что их происхождение связано с рассеянием на металлических включениях малых размеров в системе Si: Au. Измеренные в этом же диапазоне спектры рассеяния от крупных включений на поверхности композитного слоя с $\gamma = 50\%$ (см. рис. 5, образец 4c) характеризуются аналогичной полосой, что свидетельствует о присутствии в них определенного количества золота.

Результаты проведенного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) композитного слоя с $\gamma = 50\%$ в целом подтверждают выводы о его составе, полученные на основе анализа спектров КРС. Так, в состав крупных включений на поверхности слоя входят в основном атомы кремния, а пленка между включениями содержит и золото, и кремний.

3.3. Оптические свойства композитных слоев

Исследования оптических свойств образцов серии b выявили нетривиальные изменения спектров пропускания при изменении γ от 0 до 100% (рис. 6). Из рисунка видно, что даже небольшое увеличение количества распыляемого золота (до $\gamma = 8\%$) приводит к уменьшению оптического пропускания слоя в длинноволновой области спектра почти в 2 раза по сравнению со слоем без золота ($\gamma = 0\%$). Однако дальнейшее увеличение γ (от 35 до 50%, образцы 3b и 4b) приводит к просветлению слоев. Спектры пропускания слоя с $\gamma = 50\%$ близки к спектру пропускания слоев наночастиц золота (образцы 4b и 6b соответственно) — пропадают особенности, связанные с кремнием, в то время как в спектрах других композитных слоев ($\gamma = 8, 35\%$) они еще наблюдаются. При этом зеркальное отражение образцов 4b и 6b составляет всего 7–15% во всем исследованном диапазоне (200–2000 нм). Это существенно меньше зеркального отражения слоя сплошного золота такой же толщины, полученного магнетронным

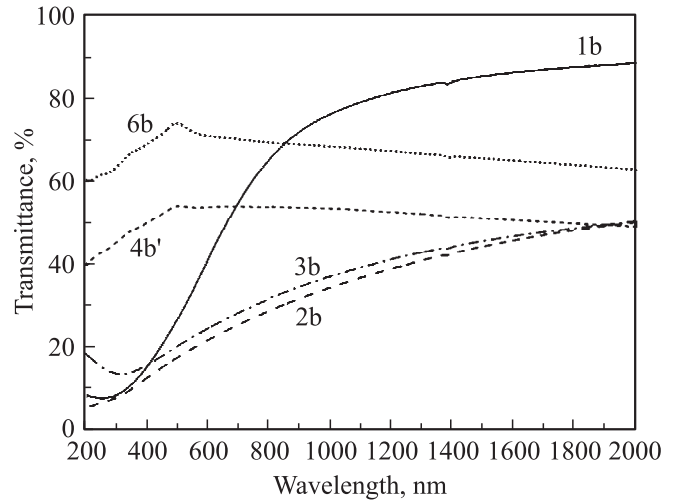


Рис. 6. Спектры оптического пропускания образцов серии b, изготовленных при различных γ (номера образцов указаны). Толщина слоев ~ 20 нм.

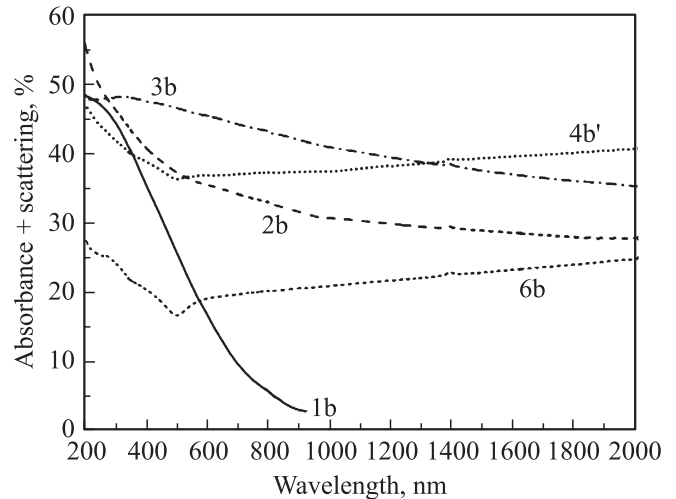


Рис. 7. Спектры поглощения (плюс диффузное рассеяние) образцов серии b, изготовленных при различных γ (номера образцов указаны). Толщина слоев ~ 20 нм.

распылением. Таким образом, в оптических свойствах композитных слоев с $\gamma = 50\%$ появляются особенности, обусловленные, по-видимому, неоднородностью и пониженной плотностью слоев из-за разных размеров и формы частиц.

На рис. 7 представлены спектры поглощения и диффузного рассеяния для всех образцов серии b. В спектре образца 1b ($\gamma = 0\%$) вблизи $\lambda = 900$ нм виден край поглощения, связанный с шириной запрещенной зоны кремниевых наночастиц. В спектрах поглощения образцов с $\gamma > 0\%$ наблюдается ненулевое поглощение в ближнем ИК диапазоне, где кремний становится прозрачным. Поглощение композитных слоев в области прозрачности кремния может быть обусловлено присутствием в слоях золота, однако поглощение композитных слоев (образцы 2b–4b) больше, чем слоя, состоящего из

наночастиц золота ($\gamma = 100\%$, образец 6b). Возможно, в композитных слоях сильнее диффузное рассеяние света, связанное с высокой концентрацией микроскопических включений. Не исключено также, что в процессе напыления композитных слоев образуется силицид золота, что приводит к еще более неоднородной структуре слоя и вносит дополнительные особенности в спектры оптического поглощения.

Вклад рассеяния света от поверхности композитных слоев ($0 < \gamma < 100\%$) действительно может быть значительным. В подтверждение этому был измерен коэффициент диффузного отражения от поверхности образца 3с на кремниевой подложке ($\gamma = 35\%$). Он оказался равным 15–20% в спектральном диапазоне 200–2000 нм (коэффициент зеркального отражения от поверхности этого образца составляет 25–35%). При этом для чистого слоя наночастиц кремния (образца 1с) коэффициент диффузного отражения не превышает 2%. Рассеяние от поверхности слоя наночастиц золота должно быть также невелико из-за отсутствия в слое микроскопических включений (см. рис. 1).

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что при одновременном распылении двухкомпонентной мишени не только изменяется состав слоя, но и происходят значительные изменения в морфологии слоев, меняются их оптические свойства, что приводит к изменениям фотоэлектрических свойств гетероструктур с такими слоями.

С увеличением содержания золота в мишени слои становятся неоднородными, появляется большое количество включений, содержащих нанокристаллы кремния и некоторое количество золота. Между включениями остается относительно однородная пленка, очень тонкая, с преобладанием золота.

Появление агломератов, содержащих нанокристаллиты, в слоях при двухкомпонентном распылении мы связываем с медленным и неоднородным процессом охлаждения больших частиц на подложке. При однокомпонентном распылении после деления капель в плазме на подложку падают расплавленные частицы размерами в несколько нанометров. Происходит практически адиабатическое охлаждение капель, которые не успевают кристаллизоваться, образуя слой аморфных наночастиц. При двухкомпонентном распылении, возможно, вследствие перемешивания паров Si и Au вблизи мишени, из мишени вылетают настолько крупные капли, что, несмотря на деление, до подложки долетают капли микрометровых размеров. Процесс охлаждения идет значительно медленнее, и в остывающих микрокаплях возможно появление нанокристаллов.

Изменения в морфологии и оптических свойствах композитного слоя происходит при $\gamma = 50\%$:

— возрастает количество агломератов, содержащих нанокристаллы с размерами, меньшими 7–9 нм, и мелких агломератов, содержащих аморфную фазу кремния;

— замедляется рост слоя;

— наблюдается значительное просветление слоев.

На основе этих результатов можно предположить, что высокая фоточувствительность структур с композитными слоями Si–Au, полученными при $\gamma = 50\%$, по сравнению со слоями других составов, обусловлена квантово-размерными и плазмонными эффектами в компактных включениях, состоящих из наночастиц кремния и золота. В этих включениях могут образовываться распределенные барьеры Au–Si и наблюдаться лавинное умножение фотоносителей.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-02-31576 и 14-29-04050, гранта президента РФ „Ведущие научные школы“ № НШ 347.2014.2.

Авторы благодарны С.И. Павлову за измерения методом РСМА.

Список литературы

- [1] А.А. Ищенко, Г.В. Фетисов, Л.А. Асланов. *Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля* (М., Физматлит, 2011) гл. 4.
- [2] О.С. Кен, Д.А. Андроников, Д.А. Явсин, А.В. Кукин, С.Н. Данилов, А.Н. Смирнов, О.М. Сресели, С.А. Гуревич. *ФТП*, **48** (11), 1555 (2014).
- [3] H.A. Atwater, A. Polman. *Nature Materials*, **9**, 205 (2010).
- [4] V.M. Kozhevnikov, D.A. Yavsin, V.M. Kouznetsov, V.M. Busov, V.M. Mikushkin, S.Yu. Nikonov, S.A. Gurevich, A. Kolobov. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18**, 1402 (2000).
- [5] V. Sans, A. Moskalenko, K. Wilson, V. Kozhevnikov, D. Yavsin, I. Kuzmin, S. Gurevich, A. Lapkin. *Analyst*, **136**, 3295 (2011).
- [6] С.А. Гуревич, Д.А. Андроников, В.Ю. Давыдов, В.М. Кожевников, И.В. Макаренко, А.Н. Титков, Д.А. Явсин, Т.Л. Кулова, А.М. Скундин. *Тр. XIV Междунар. симп. „Нанофизика и нанoeлектроника“* (Н.Новгород, Россия, 2010) т. 2, с. 333.
- [7] O.S. Ken, D.A. Yavsin, S.A. Gurevich, O.M. Sreseli. *Advance Scientific Programme of the Conf. CLEO/Europe-EQEC 2015, CK-P.1 MON* (Munich, Germany, June 2015) p. 116.
- [8] D. Beeman, R. Tsu, M.F. Thorpe. *Phys. Rev. B*, **32** (2), 874 (1985).
- [9] P. Danesh, B. Pantchev, K. Antonova, E. Liarokapis, B. Schmidt, D. Grambole, J. Baran. *J. Phys. D*, **37**, 249 (2004).
- [10] R. Tsu, J.G. Hernandez, F.H. Pollak. *J. Non-Cryst. Solids*, **66**, 109 (1984).
- [11] Zh. Li, W. Li, Ya Jiang, H. Cai, Yu. Gong, J. He. *J. Raman Spectrosc.*, **42**, 415 (2011).
- [12] R.L.C. Vink, G.T. Barkema, W. F. van der Weg. *Phys. Rev. B*, **63**, 115 210 (2001).
- [13] N. Maley, D. Beeman, J.S. Lannin. *Phys. Rev. B*, **38**, 10 611 (1988).
- [14] N.M. Liao, W. Li, Y.D. Jiang, Y.J. Kuang, K.C. Qi, Z.M. Wu, S.B. Li. *Appl. Phys. A*, **91**, 349 (2008).
- [15] M. Marinov, N. Zotov. *Phys. Rev. B*, **55**, 2938 (1997).
- [16] N.M. Liao, W. Li, Y.D. Jiang, Z.M. Wu, S.B. Li, Z. Liu, Z. Li, X. Jin, Y.X. Chen. *J. Phys. D*, **41**, 205 412 (2008).
- [17] Е.В. Астрова, Г.В. Ли, А.В. Парфеньева, А.М. Румянцев, В.В. Жданов, С.И. Павлов, В.С. Левицкий, Е.И. Теруков, В.Ю. Давыдов. *ЖТФ*, **85**, 52 (2015).

- [18] H. Richter, Z.P. Wang, L. Ley. *Sol. St. Commun.*, **39** (5), 625 (1981).
[19] H. Campbell, P.M. Fauchet. *Sol. St. Commun.*, **58** (10), 739 (1984).

Редактор Л.В. Шаронова

Optical and morphological properties of composite Si: Au layers, made by laser electrodispersion

O.S. Ken, V.S. Levitskii, D.A. Yavsin, S.A. Gurevich, V.Yu. Davydov, O.M. Sreseli

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Composite Si–Au layers, made by laser electrodispersion method with different Si–Au ratio were investigated. The microscopic structure, Raman spectra, transmission and reflection spectra of the layers were studied. It was shown that sputtering of a two-component Si–Au target produces marked changes in the layer morphology. The layers become inhomogeneous with a lot of inclusions consisting of Si nanocrystals and some quantity of Au. The inclusions arise from great molten drops escaping target. Reaching the substrate they turn out to be not divided into particles of nanometer dimensions. Nanocrystal structure of inclusions is explained by slow and irregular cooling of these large particles on the substrate. Formation of inclusions, consisting of Si nanocrystals and some Au, is suggested to be responsible for spectral changes and photosensitivity of heterostructures with the layers investigated.