

Влияние отжига в атмосфере атомарного водорода на свойства пленок аморфного гидрированного кремния и параметры $p-i-n$ -структур на их основе

© М.М. Мездрогина, А.В. Абрамов, Г.Н. Мосина, И.Н. Трапезникова, А.В. Пацекин

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

(Получена 19 июня 1997 г. Принята к печати 14 июля 1997 г.)

Уменьшение концентрации оборванных кремний-кремниевых связей в пленках $a\text{-Si:H}$ в результате отжига в атмосфере атомарного водорода определяется концентрацией их в исходной (неотоженной) пленке. Изменение суммарной концентрации водорода в пленках $a\text{-Si:H}$, подвергнутых отжигу в атмосфере атомарного водорода, определяется типом кремний-водородных связей, содержанием примесей: при наличии монокридных связей (2020 см^{-1}) возможно уменьшение содержания водорода до 1 ат.%, при наличии кислорода ($\lesssim 0.1$ ат.%) изменения содержания водорода не наблюдаются. Уменьшение концентрации дефектов в результате отжига в атмосфере атомарного водорода наблюдается для всех пленок. Эффект Стаблера-Вронского — облучение светом АМ-1 в течение 10 ч наблюдается для всех пленок вне зависимости от суммарной концентрации водорода, типа кремний-водородных связей, наличия кислорода.

Введение

Использование пленок аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$) для изготовления ряда приборов: фотопреобразователей, полевых транзисторов, датчиков излучения до сих пор оставляет актуальными проблемы управления концентрацией и типами дефектов неупорядоченной структурной сетки, формирования морфологии структуры пленок.

В настоящее время предложен целый ряд методов осаждения, позволяющих свести к минимуму концентрацию дефектов неупорядоченной структурной сетки ($10^{14} - 10^{15}\text{ см}^{-3}$), локальных неоднородностей, негомогенностей микроструктуры, возникающих в процессе осаждения двухкомпонентных аморфных пленок — $a\text{-Si:H}$ [1,2].

Известно также, что вопросы стабильности фотоэлектрических параметров под влиянием облучения (эффект Стаблера-Вронского), обусловленные образованием дефектов вследствие конверсии слабых кремний-кремниевых связей в оборванные, могут быть связаны с наличием "избыточного" водорода в неупорядоченной структурной сетке $a\text{-Si:H}$.

Проблема нанесения пленок $a\text{-Si:H}$, имеющих суммарную концентрацию водорода, равную концентрации оборванных кремний-кремниевых связей в неупорядоченной структурной сетке ($10^{19} - 10^{20}\text{ см}^{-3}$) негидрированного аморфного кремния, не может быть решена в рамках традиционно используемых (методы разложения силановых смесей в высокочастотном разряде циклотронного резонанса, "горячей стенки" и т.д.) методик осаждения при условии, что суммарная концентрация дефектов в пленках (оборванных кремний-кремниевых связей) не превышает 10^{16} см^{-3} .

Варьирование основных технологических параметров нанесения — скорости роста, температуры подложки, конструкции реактора — не позволяет получать пленки с концентрацией водорода, меньшей 6 ат.% [2,3].

В то же время проблема получения пленок $a\text{-Si:H}$ с минимальной концентрацией водорода, равной концентрации оборванных кремний-кремниевых связей, важна не только с точки зрения оптимизации оптоэлектронных параметров $a\text{-Si:H}$, совершенствования параметров приборов на их основе, в частности, подавления эффекта Стаблера-Вронского, но и с точки зрения исследования однокомпонентного однофазного материала с минимальной концентрацией дефектов неупорядоченной структурной сетки.

Другой, не менее важной задачей является пассивация водородом оборванных кремний-кремниевых связей при кристаллизации $a\text{-Si:H}$ с целью получения пленок, обладающих максимально возможной величиной удельного сдвига электронов $(\mu\tau)_n$, что весьма существенно при изготовлении тонкопленочных полевых транзисторов. В этом случае пленки должны содержать после высокотемпературного отжига не менее 6–8 ат.% водорода.

Известны несколько способов решения данных проблем.

1. Нанесение пленок $a\text{-Si:H}$ при высоких температурах подложек, что дает возможность уменьшения в них содержания водорода. Недостатком данного способа является неоднородный концентрационный профиль водорода по толщине пленки [2].

2. Уменьшение содержания водорода может быть достигнуто путем высокотемпературного или весьма длительного отжига в вакууме, но при этом увеличивается концентрация дефектов [4] в пленках.

3. Бомбардировка поверхности пленки ионами Si, что также приводит к увеличению концентрации дефектов.

4. Отжиг в атмосфере атомарного водорода, так называемый метод "химического травления", в процессе которого уменьшается суммарная концентрация водорода вследствие уменьшения концентрации слабых, напряженных кремний-водородных связей [5].

Цель данной работы заключается в исследовании влияния отжига в атмосфере атомарного водорода на пара-

Таблица 1. Технологические параметры нанесения и отжига пленок a -SiH

Технологические параметры	Пленки a -SiH		
	I	II	III
Температура осаждения, T_s , °C	380	380	340
Скорость осаждения, Å/с	0.8 ÷ 2.5	0.5 ÷ 0.8	1 ÷ 1.5
Температура отжига, T_a , °C	380	380	380
Давление газовой смеси (ммрт.ст.) при осаждении	$(2 \div 3) \cdot 10^{-2}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Давление газовой смеси при отжиге	$(2 \div 3) \cdot 10^{-2}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Режим отжига, мин	a, c	a	a, b, c
Время отжига, мин	30–60	30	30–60

Таблица 2. Суммарная концентрация водорода (C_H) до и после отжига, тип кремний-водородных связей, наличие кислорода, положение ε_f , величины энергии активации температурной зависимости темновой проводимости (ΔE_σ) в пленках a -SiH

Тип пленок	Суммарное содержание водорода до отжига, C_H , %	Тип кремний-водородных связей	Содержание кислорода, %	$\varepsilon_c - \varepsilon_f$, эВ	ΔE_σ , эВ	C_H после отжига, %
I	8 ÷ 10	Si–H (2000 см^{-1})	< 0.1	0.63 ÷ 0.79	0.73 ÷ 1.05	5 ÷ 8
II	8 ÷ 15	Si–H (2020 см^{-1})	< 0.1	0.65 ÷ 0.73	0.78 ÷ 0.90	1 ÷ 10
III	10 ÷ 17	Si–H (2020 см^{-1})	~ 0.1	0.63 ÷ 0.77	0.73 ÷ 0.96	10 ÷ 16

метры пленок a -Si:H, имеющих различные концентрации кислорода. Особое внимание будет уделено исследованию пленок, имеющих суммарное содержание водорода не более 1 at.%.

Получение пленок a -Si:H и методы их исследований

Нелегированные и легированные пленки (n - и p -типов проводимости) были получены методом высокочастотного метода разложения моносилана в тетродной и триодной (с использованием подвижной заслонки) системах. Использование многоэлектронных систем (тетродной, триодной), как было показано ранее [6], дает возможность управления положением уровня Ферми ε_F без изменения технологических параметров, путем варьирования импеданса промежуточных сеток.

Параметры осаждения и режимы отжига исследуемых пленок, различающихся по типам кремний-водородных связей и суммарной концентрации водорода, приведены в табл. 1. Для всех типов пленок температуры осаждения и отжига равны. Режим отжига — непосредственно после нанесения, без экспонирования на воздухе (a), попеременный отжиг и нанесение (b), отжиг после экспонирования на воздухе (c).

В табл. 2 приведены типы кремний-водородных связей, суммарная концентрация водорода до и после отжига пленок, изменения положения ε_F , величины энергии активации температурной зависимости темновой проводимости — ΔF_σ .

В качестве подложек использовали кварц, ситалл, стекло марки Corning 7059. Монокристаллический кремний марки КДБ-4.5 и 10 с кристаллографическими

ориентациями $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ использовали для нанесения пленок при определении типов кремний-водородных связей и суммарного содержания водорода с помощью инфракрасной спектроскопии (анализировалась полоса при 630 см^{-1}). ИК фурье-спектрометр также использовали как при определении суммарного содержания водорода, так и при идентификации кремний-водородных, кремний-кислородных связей. Легированные слои наносились из газовых смесей — силан-фосфиновых, силан-диборановых. Уровень легирования в случае осаждения p -слоя равен 0.3 at.%, в случае осаждения n -слоя — 0.25 at.% ($B_2H_6/SiH_4 + B_2H_6, PH_3/SiH_4/PH_3$). Как было показано ранее [7], малый уровень легирования при осаждении слоя p -типа проводимости дает возможность сдвигать максимум фоточувствительности в коротковолновую область спектра, а малый уровень легирования при осаждении слоя n -типа проводимости дает возможность увеличения удельного сдвига дырок $(\mu\tau)_p$ [7].

Структуры $p-i-n$, с барьером Шоттки ($n-i-Pt$) наносились на различные подложки: на ситалл с токопроводящим электродом, на стекло с токопроводящими слоями окислов олова, индия. Все полученные структуры освещали со стороны p -слоя [6]. Толщины p -слоя варьировались от 200 до 800 Å, n -слоя — от 150 до 1000 Å, нелегированного слоя — от 1500 до 8000 Å. Структуры ($p-i-n$, $n-i-Pt$) были сформированы на различных пленках — неотожженных, подвергнутых отжигу после нанесения p, i -слоев без экспонирования на воздухе, с чередующимися процессами нанесения и отжига при осаждении p, i -слоев. Добавка кислорода из паров воды при нанесении нелегированных слоев производилась с целью сдвига максимума фоточувствительности в коротковолновую область спектра. Концентрация оборванных кремний-кремниевых связей для пленок типа II–III отличалась незначительно ($N_{DII} \sim N_{DIII}$).

Измерения параметров пленок

Спектры поглощения измерялись на ИК спектрометре IFS-113V в диапазоне $530\text{--}4500\text{ см}^{-1}$ с разрешением 2.0 см^{-1} , с усреднением по 1000 сканирований. На спектрах отчетливо видны линии поглощения изгибных мод колебаний Si–H-связей в области 645 см^{-1} и валентных колебаний тех же связей в области $2000\text{--}2100\text{ см}^{-1}$.

На основании данных работы [7] предполагалось, что отжиг в атмосфере атомарного водорода позволяет получать более однородный концентрационный профиль водорода по толщине пленки, т. е. отжиг способствует сглаживанию неоднородностей на интерфейсе подложка–слой *a*-Si:H.

Исследование микроструктуры полученных пленок проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии при ускоряющем напряжении 100 кВ. Использовались режимы светлопольного изображения и микродифракции. Образцы для исследования микроструктуры готовились методом химико-динамического травления со стороны подложки.

Концентрацию дефектов (оборванных кремний-кремниевых связей), N_D , параметр Урбаха определяли на основе данных по оптическому поглощению, полученных методом постоянного фототока.

Фотопроводимость была измерена при потоке фотонов $I = 10^{15}\text{ фот/см}^2\text{ с}$ $h\nu = 2\text{ эВ}$ при комнатной температуре.

Показатель преломления пленок типа I и III определяли по данным эллипсометрии. По спектрам пропускания определяли оптическую ширину запрещенной зоны и показатель преломления.

Фотолюминесценция исследуемых пленок измерялась по стандартной методике при $T = 77\text{ К}$, возбуждение осуществлялось Ar-лазером с энергией фотонов 2.54 эВ и мощностью 120 мВт . Спектральные характеристики определялись при освещении водородной лампой и лампой накаливания (в диапазоне от 0.25 до 0.80 мкм).

Результаты и обсуждение

На рис. 1, *a, b* приведены изменения величины энергии активации температурной зависимости темновой проводимости и фотопроводимости пленок до и после отжига в атмосфере атомарного водорода (режим *a*), зависимости фото- и темновой проводимости (σ_{ph} , σ_d) [3,4] от величины $\varepsilon_c - \varepsilon_F$, определяемой из выражения $\varepsilon_c - \varepsilon_F = kT \ln(\sigma_0/\sigma)$, где ε_c — край зоны проводимости, ε_c — положение уровня Ферми, $\sigma_0 = 150\text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, и от величины энергии активации темновой проводимости (определяемой экспериментально) — ΔE_σ . Видно, что наблюдается изменение положения уровня Ферми — сдвиг к середине зазора подвижности — E_g . Аналогичное изменение положения уровня Ферми наблюдается и при отжиге в вакууме [4]. В отличие от отжига в вакууме, при отжиге в атмосфере атомарного водорода наблюдается

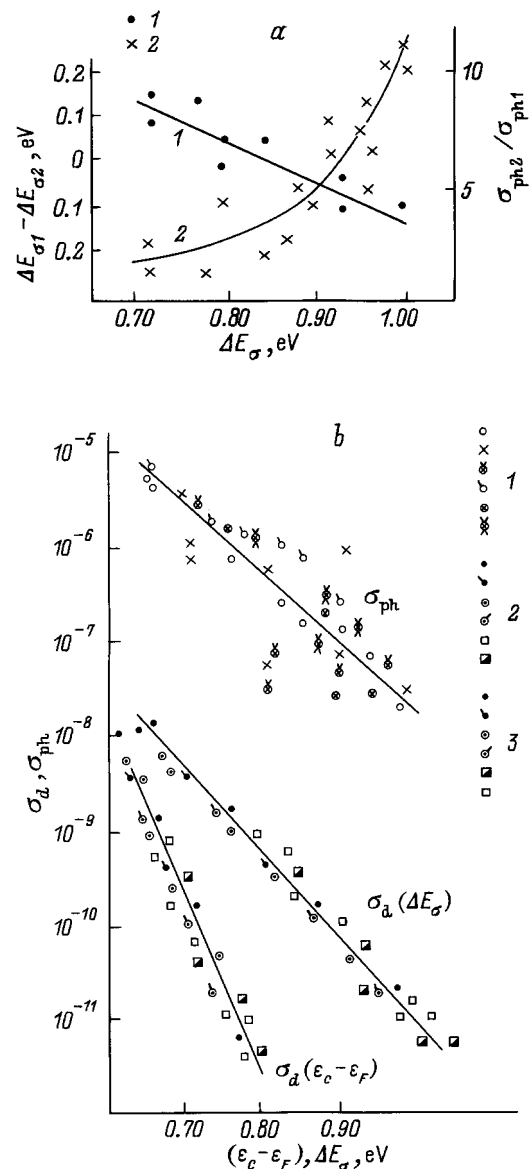


Рис. 1. *a* — изменение величины энергии активации температурной зависимости темновой проводимости — ΔE_σ (1) и фоточувствительности $\sigma_{ph2}/\sigma_{ph1}$ (2) пленок *a*-Si:H до и после отжига в атмосфере атомарного водорода, *b* — зависимости фото- (1) и темновой (2,3) проводимости от $\varepsilon_c - \varepsilon_F$, ΔE_σ пленок *a*-Si:H (тип I, II, III) до и после отжига.

увеличение фотопроводимости, т. е. величина отношения фотопроводимости после отжига к величине фотопроводимости до отжига зависит от положения уровня Ферми, величины энергии активации темновой проводимости в исходной пленке и велико при значении $\Delta E_\sigma \geq 0.90\text{ эВ}$. Изменения концентрации дефектов в пленках *a*-Si:H в результате отжига в атмосфере атомарного водорода (рис. 2) зависят от их концентрации в исходной пленке: величина отношения N_{D2}/N_{D1} тем больше, чем меньше концентрация дефектов в пленке до отжига. Изменение зарядового состояния дефектов типа $D^- \rightarrow D^0$ или

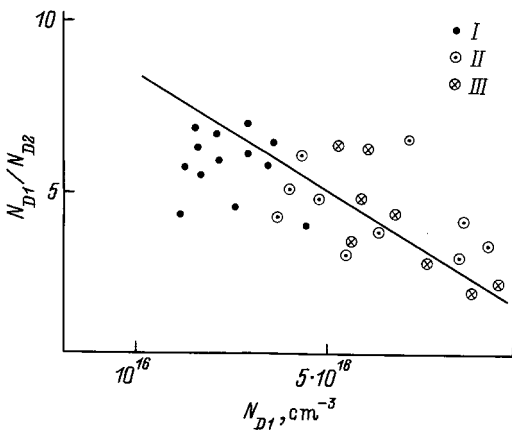


Рис. 2. Изменение отношения концентраций дефектов неупорядоченной структуры сетки в пленках *a*-Si:H (тип I, II, III) до (N_{D1}) и после (N_{D2}) отжига в атмосфере атомарного водорода.

$D^+ \rightarrow D^0$ может быть причиной уменьшения суммарной концентрации дефектов. В работе [8], было показано, что энергетическое положение дефектов в зазоре подвижности определяется механизмом создания дефектов — в процессе роста пленки. Варьирование кинетики роста, условий отжига определяет тип, концентрацию дефектов. Уменьшение концентрации "плавающих" связей (пятикоординированных атомов кремния) может также привести к уменьшению N_D . Уменьшение суммарной концентрации дефектов может быть вызвано образованием нано-, микрокристаллитов, способствующих уменьшению напряжения в структурной сетке аморфного кремния. Изменения концентрации дефектов в результате отжига не коррелируют с изменением концентрации водорода. Малое изменение суммарной концентрации водорода в результате отжига в атмосфере атомарного водорода может быть обусловлено различными причинами:

— наличием гомогенной микроструктуры, малой концентрацией напряженных, "слабых" кремний-водородных связей. Известно [7], что гомогенная микроструктура наблюдается в пленках, имеющих малую величину отношения дигидридов к моногидридам кремния, что соответствует малой величине отношения интенсивностей линий 2090 и 2000 см^{-1} .

Пленки, исследованные в данной работе, отличались различной степенью неоднородности микроструктуры, и различное изменение суммарной концентрации водорода может быть связано с различными значениями отношения концентраций дигидридов к моногидридам кремния в исходной пленке. Так, например, пленки типа I, имели лишь моногидридные связи (2000 см^{-1}), пленки типа II — кластеризованные моногидридные связи (2020 см^{-1}), пленки типа III — моногидридные связи (2020 см^{-1}) и кремний-кислородные связи (1060 см^{-1}). Изменение суммарного содержания водорода после отжига не наблюдается у пленок типа III, мало у пленок типа I.

Малое изменение концентрации водорода в результате отжига в атмосфере атомарного водорода может быть обусловлено:

— образованием молекулярного водорода ($\text{H} + \text{H} = \text{H}_2 \uparrow$) и большим временем жизни H_2 в присутствии какого-либо третьего компонента. В таком случае изменение суммарного содержания водорода в пленках *a*-Si:H в результате отжига в атмосфере атомарного водорода также будет мало, поскольку поверхность отжигаемой пленки покрыта слоем молекулярного водорода. Кислород, малые добавки которого ($\approx 0.1 \text{ at.}\%$), как было показано в работе [7], при температуре осаждения $T > 300^\circ\text{C}$ существенно увеличивают значение удельного сдвига электронов $(\mu\tau)_n$, может играть роль "третьего" компонента, способствующего малому изменению концентрации водорода в результате отжига. Увеличение $(\mu\tau)_n$, вероятно, связано с модификацией поверхности пленки при отжиге;

— наличием нано-, микрокристаллитов в исходной пленке. В этом случае наблюдаемые изменения концентрации дефектов могут быть обусловлены уменьшением высоты потенциального барьера на границе между аморфной и микрокристаллической фазами. Отсутствие изменения концентрации водорода до и после отжига в пленках типа III может быть обусловлено как наличием примесей, так и второй фазы. Измерения оптических параметров фотолюминесценции, микроструктуры, приведенные на следующих рисунках, свидетельствуют в пользу наличия примесей.

На рис. 3 представлены данные по изменению показателя преломления n и оптической ширины запрещенной зоны от величины показателя преломления в исходных пленках. Для пленок типа III, I при малом изменении концентрации водорода наблюдается уменьшение показателя преломления. Отжиг пленок типа III в вакууме ($T = 400^\circ\text{C}$, время отжига — 2 ч) и в атмосфере атомарного водорода не привел к существенному изменению фотоэлектрических параметров, а содержание

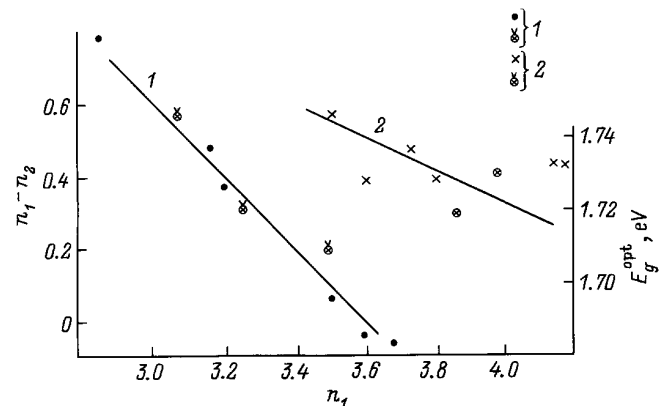


Рис. 3. Изменение величин показателя преломления ($n_1 - n_2$) (1) и оптической ширины запрещенной зоны (2) E_g^{opt} пленок *a*-Si:H до и после отжига в зависимости от величины показателя преломления исходной пленки.

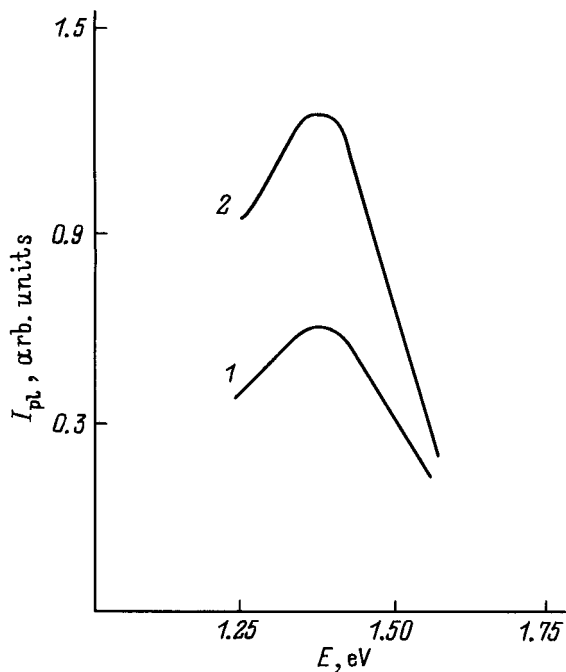


Рис. 4. Интенсивность фотолюминесценции в пленках $a\text{-Si:H}$ до (1) и после (2) отжига.

водорода уменьшилось до 8 и 10 at.% соответственно. Уменьшились величины показателя преломления n и E_g^{opt} . Для пленок типа I и II наблюдалось увеличение показателя преломления и небольшое уменьшение E_g^{opt} . Для пленок с суммарным содержанием водорода после отжига, не превышающим 1 at.%, не наблюдалось резкого уменьшения E_g^{opt} . Спектр фотолюминесценции для этих пленок на монокристаллическом кремнии также существенно не изменился, увеличилась лишь интенсивность фотолюминесценции (рис. 4).

Уменьшение показателя преломления для пленок, в которых после отжига наблюдалось малое изменение концентрации водорода, может быть связано с увеличением неоднородности микроstructures, поскольку (рис. 3) уменьшение показателя преломления тем больше, чем меньше его величина в исходной пленке. Увеличение гетерогенности микроstructures должно было бы привести к увеличению темновой проводимости и к уменьшению фотопроводимости, чего не наблюдается в данном случае (рис. 1). Не наблюдается и увеличения концентрации дефектов. Их концентрация, согласно данным метода постоянного фототока, уменьшается (рис. 2).

Можно предположить, что имеет место образование микрокристаллитов в неупорядоченной структурной сетке аморфного кремния, способствующих уменьшению напряжений, уменьшению высоты потенциальных (деформационных) барьеров между фазами и, следовательно, уменьшению концентрации дефектов. В то же время наличие границ раздела между кристаллической и аморфной фазами приводит к увеличению неоднородности микроstructures.

Изменения микроstructures пленок $a\text{-Si:H}$ (тип I, в котором наблюдается уменьшение концентрации водорода), осажденных на монокристаллическую подложку и подвергнутых отжигу в атмосфере атомарного водорода, представлены на рис. 5. На вставках к рис. 5, *a, b* показаны изменения микродифракционной картины для тех же пленок. Видно, что до отжига пленки были аморфны. После отжига в атмосфере атомарного водорода происходит полная кристаллизация. Пленки кристаллизуются в ориентации подложки, на которую они были нанесены. Светлопольное изображение (рис. 5, *a*) свидетельствует о наличии столбчатой структуры с размером зерен 100–250 нм. Внутри зерен видна большая плотность мелких образований, предположительно пор, с размерами 40–50 Å. Появление микрокристаллитов не приводит к существенному изменению спектров фотолюминесценции для пленок. Увеличивается интенсивность фотолюминесценции при 1.36 эВ, энергетическое положение этого пика, характерного для аморфного гидрированного кремния, не изменяется (рис. 4).

По данным ИК спектроскопии, пленки $a\text{-Si:H}$, нанесенные на КДБ различных марок — 4.5 и 10 с различными кристаллографическими индексами — $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, имеют различное содержание водорода. Микроstructure и микродифракционная картина пленок приведена на рис. 6. Видно, что информация о типах кремний-водородных связей и суммарной концентрации водорода различна для одного и того же технологического процесса и зависит от типа подложки.

На рис. 7 приведены спектральные характеристики $p-i-n$ -структур на основе исследуемых пленок $a\text{-Si:H}$. Видно, токовая чувствительность структур увеличивается в результате отжига в атмосфере атомарного водорода, что согласуется с уменьшением концентрации дефектов на негидрированных слоях, подвергнутых отжигу. Это справедливо для всех структур, сформированных на различных по исходной концентрации дефектов пленках. Сдвиг максимума fotocувствительности наблюдается лишь в том случае, когда отжигу подвергается p -слой или попеременно (с чередованием процесса нанесения и отжига) наносили p -слои. Максимальная величина токовой чувствительности исследуемых структур при $\lambda = 0.35$ мкм равна 0.12 А/Вт.

Исследование эффекта Стаблера–Вронского (освещение АМ-1 в течение 10 ч) на пленках до и после отжига показало, что увеличение концентрации дефектов до $8 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в результате облучения имеет место для всех типов пленок. Для пленок, содержание водорода в которых не превышает 1 at.%, изменение концентрации оборванных связей невелико — от $7 \cdot 10^{16}$ до $1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Одновременно наблюдается увеличение энергии Урбаха от 50–70 до 90–110 мэВ.

На основании полученных данных по влиянию отжига в атмосфере атомарного водорода на параметры пленок $a\text{-Si:H}$ и $p-i-n$ -структуры на их основе можно сделать следующие выводы.

1. Возможно уменьшение содержания водорода в пленках, подвергнутых отжигу, до 1 at.%. При этом пленки

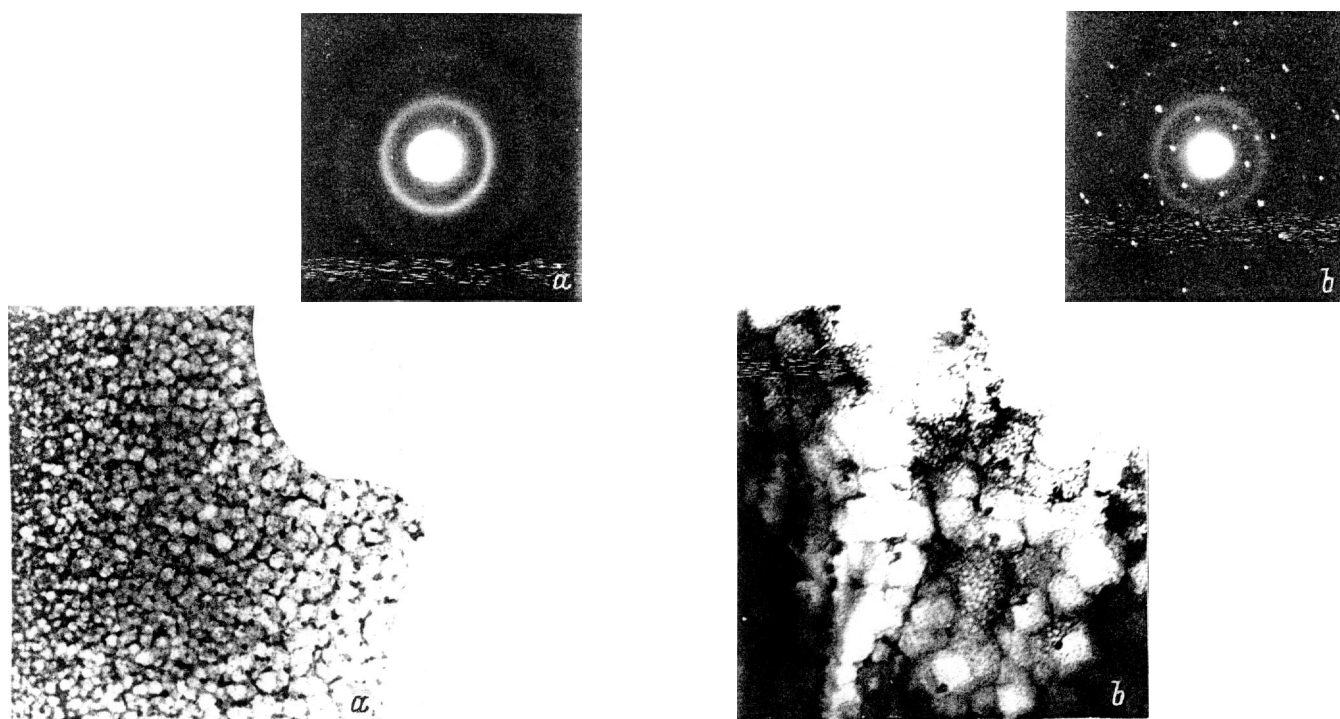


Рис. 5. *a* — светлпольное контрастное изображение пленки $a\text{-Si:H}$ до отжига (концентрация водорода 8.3 at.%, толщина 0.7 мкм). На вставке — микродифракционная картина той же пленки. *b* — светлпольное контрастное изображение пленки $a\text{-Si:H}$ после отжига (концентрация водорода менее 1 at.%, толщина 0.4 мкм). На вставке — микродифракционная картина той же пленки.

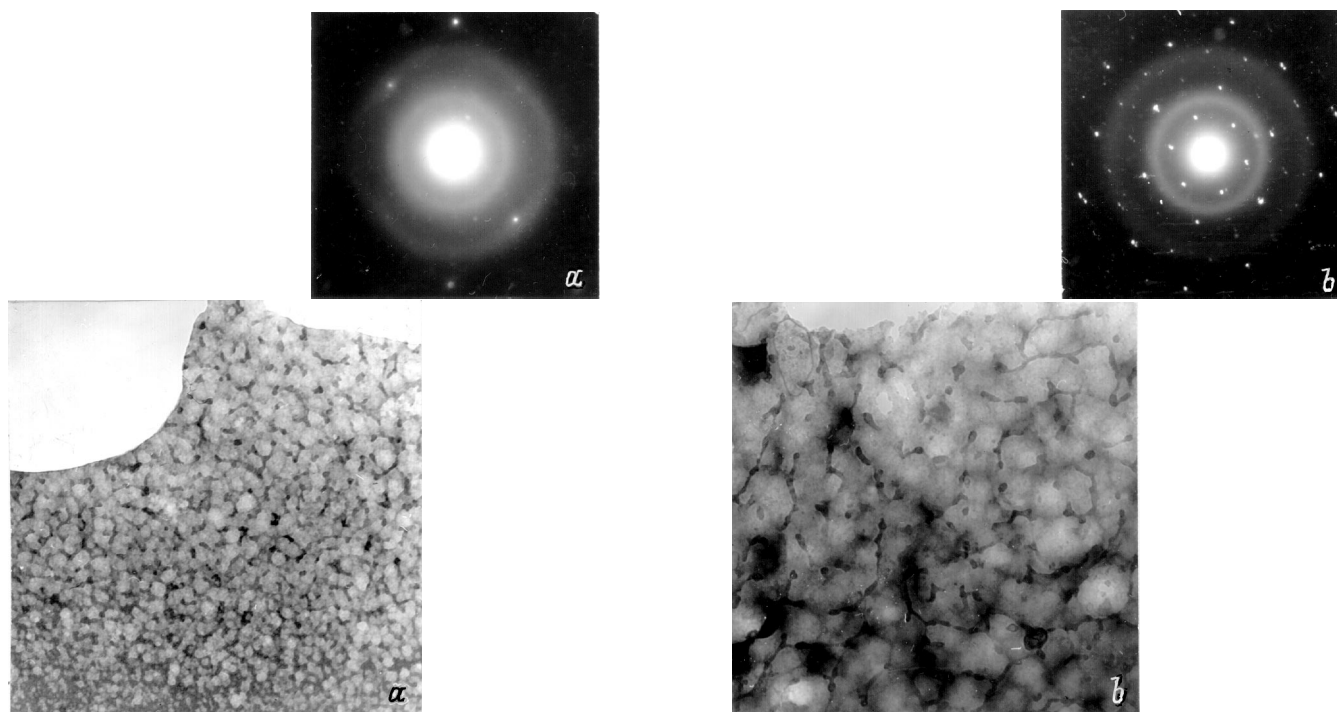


Рис. 6. *a* — светлпольное контрастное изображение пленки $a\text{-Si:H}$ нанесенной на подложку КДБ-4.5 [100]. На вставке — микроструктурная картина той же пленки. *b* — светлпольное контрастное изображение пленки $a\text{-Si:H}$, нанесенной на подложку КДБ-10 [111]. На вставке — микроструктурная картина той же пленки.

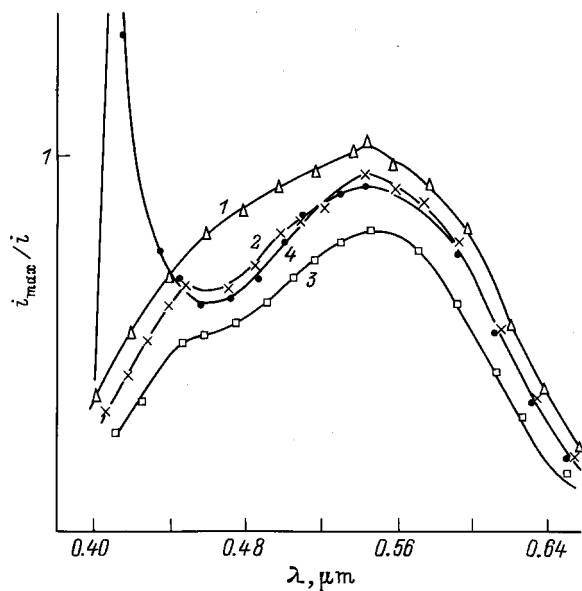


Рис. 7. Спектральные характеристики $p-i-n$ -структур на основе $a\text{-Si:H}$ пленок. 1 — в качестве i -слоя использован I тип пленок $a\text{-Si:H}$, 2 — в качестве i -слоя использован III тип пленок $a\text{-Si:H}$ после отжига, 3 — в качестве i слоя использован III тип пленок $a\text{-Si:H}$ с попеременным отжигом p -слоя в процессе нанесения.

имеют суммарную концентрацию дефектов не более $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Величина оптической ширины запрещенной зоны изменяется незначительно — от 1.76 до 1.73 эВ.

2. Введение кислорода (0.1 at.%) в газовую смесь из паров воды дает возможность практически не изменять концентрацию водорода в результате отжига, но при этом уменьшать концентрацию дефектов в неупорядоченной структурной сетке.

3. Изменение микроструктуры пленок $a\text{-Si:H}$, интенсивности ФЛ, показателя преломления и сдвиг уровня Ферми к середине зазора подвижности обусловлен процессом "подтравливания" поверхности растущей или нанесенной пленки атомарным водородом.

4. Суммарное содержание водорода, тип кремний-водородных связей, определяемые с помощью метода ИК спектроскопии, зависят от вида кристаллографической ориентации монокристаллической подложки.

5. Эффект Стаблера–Вронского наблюдается для пленок, суммарное содержание водорода в которых не превышает 1 at.%. Вероятно, конверсия слабых кремний-кремниевых связей в оборванные обусловлена типами дефектов неупорядоченной структурной сетки аморфного кремния, создаваемых с использованием кремний-водородных радикалов.

Список литературы

- [1] T. Takahagi, S. Shiguba, H. Sakaia, K. Honishino, H. Yashina. Japan. J. Appl. Phys., Pt. II, **35**, L818 (1996).
- [2] Q. Zhang, T. Nishino, H. Takasina, M. Kumeda, T. Shimizu. Japan. J. Appl. Phys., **35**, 4409 (1996).
- [3] О.А. Голикова, М.М. Казанин, О.И. Коньков, В.Х. Кудоярова, Е.И. Теруков. ФТП, **30**, 405 (1996).
- [4] О.А. Голиков, М.М. Казанин, Х.Ю. Мавлянов. ФТП, **28**, 1329 (1994).
- [5] K. Asano. Appl. Phys. Lett., **56**, 533 (1989).
- [6] М.М. Мездрогина, О.А. Голикова, К. Арлаускас, Г. Юшка, М.М. Казанин, Р. Хайдаров. Неорг. матер., **27**, 666 (1991).
- [7] М.М. Мездрогина, О.А. Голикова, М.М. Казанин, Р. Икрамов. ЖТФ, **62**, вып. 1, 108 (1992).
- [8] G. Schumm. Phys. Rev. B, **49**, 2442 (1994).

Редактор В.В. Чалдышев

The influence of annealing in atomic hydrogen atmosphere on the $a\text{-Si:H}$ films properties and parameters of $p-i-n$ structures on the basis of the these films

М.М. Mezdrogina, A.V. Abramov, G.N. Mosina, I.N. Trapeznikova, A.V. Patsekin

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The decrease in dangling Si-Si bonds concentration in $a\text{-Si:H}$ films after annealing in atomic hydrogen atmosphere is determined by their concentration in as-deposited films. The change of total hydrogen concentration in $a\text{-Si:H}$ films after annealing in atomic hydrogen atmosphere depends on the type of Si-H bonds and impurity content. Namely, when Si-H bonds (2020 cm^{-1}) are available in the film the hydrogen concentration may become as low as 1 at.%. When oxygen content is about 0.1 at.%, there is no change in hydrogen concentration in the film. The decrease in defect concentration as a result of annealing in atomic hydrogen atmosphere takes place for all films. Staebler-Wronski effect (the light exposure during 10 hours) has been observed for all films regardless of hydrogen concentration, type of hydrogen bonding and oxygen existence.