

Об особенностях процессов рекомбинации в слоистых пленках $a\text{-Si:H}$

© И.А. Курова, Н.Н. Ормонт[†]

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),
119992 Москва, Россия

(Получена 4 августа 2011 г. Принята к печати 16 августа 2011 г.)

Спектральный состав поглощаемого света определяет тип генерации носителей тока — межзонную или смешанную генерацию, которая включает также генерацию электронов с уровней хвоста валентной зоны. Тип генерации влияет на величину и температурную зависимость темпа рекомбинации электронов в слоистых пленках $a\text{-Si:H}$. Это влияние обусловлено изменением заполнения электронами уровней оборванных связей кремния и уровней хвоста валентной зоны при смене типа генерации носителей тока. В результате при смешанной генерации носителей тока в исследованных пленках, имеющих малую врожденную концентрацию оборванных связей, рекомбинация электронов на них мала и рекомбинация на уровнях хвоста валентной зоны может преобладать вплоть до комнатных температур.

1. Введение

В работе исследовались слоистые пленки $a\text{-Si:H}$, выращенные методом плазмохимического циклического осаждения с послыйным отжигом в водородной плазме [1]. Как показали первые исследования, эти пленки имеют высокую фотопроводимость при малой темновой проводимости. Обнаружены и другие особенности фотозлектрических свойств слоистых пленок [2,3]. Было установлено отсутствие эффекта температурного гашения фотопроводимости в широком интервале интенсивностей освещения пленок при межзонной генерации носителей тока в них. Этот эффект, наблюдаемый в стандартных пленках $a\text{-Si:H}$ в области температур 150–300 К обусловлен возрастанием с температурой рекомбинации электронов вследствие изменения заполнения ими основных рекомбинационных уровней в $a\text{-Si:H}$ — уровней оборванных связей кремния и уровней хвоста валентной зоны. Перезарядка этих уровней определяется тем, что отношение коэффициента захвата электронов к коэффициенту захвата дырок для уровней оборванных связей значительно больше, чем для уровня хвоста валентной зоны [4–6].

Перезарядка локальных уровней оборванных связей кремния и уровней хвоста валентной зоны зависит от температуры и интенсивности освещения. Она может зависеть и от спектрального состава поглощаемого света, определяющего тип генерации носителей: межзонной или смешанной, включающей также генерацию электронов с уровней хвоста валентной зоны. В настоящей работе проводились исследования влияния типа генерации носителей на величину и температурную зависимость фотопроводимости, которые могут дать сведения о процессах перезарядки и рекомбинации в слоистых пленках $a\text{-Si:H}$. Подобные экспериментальные исследования нам не известны. Теоретические расчеты температурной зависимости фотопроводимости стандартных пленок $a\text{-Si:H}$ проводились только для меж-

зонной генерации носителей [4–6]. В то же время в ряде приборов оптоэлектроники имеет место смешанная генерация носителей.

2. Образцы и методика измерений

Исследованные слоистые пленки $a\text{-Si:H}$ были выращены в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете методом циклического плазмохимического осаждения с обработкой каждого слоя в водородной плазме [3]. Толщина слоя составляла 16 нм при общей толщине слоистой пленки — 500 нм. Контакты планарной конфигурации были сделаны из алюминия. Вольт-амперные характеристики пленок были линейны в области используемых напряжений.

В работе проводились измерения температурных зависимостей фотопроводимости пленок $\sigma_{ph}(T)$ после их отжига в вакууме при $T = 190^\circ\text{C}$ в течение одного часа, а также после их предварительного освещения при комнатной температуре. Предварительное освещение пленок осуществлялось от галогенной лампы с инфракрасным фильтром с интенсивностью 40 мВт/см^2 в течение одного часа. Измерения фотопроводимости проводились в области температур 130–420 К при нагреве пленок после их медленного охлаждения от температуры отжига. Чтобы предотвратить световую деградацию пленок, фотопроводимость измерялась при кратковременном освещении пленок. Для изменения спектра поглощаемого света использовался набор фильтров, пропускающих свет в определенной области длин волн. Для изменения интенсивности освещения использовались нейтральные фильтры.

3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 приведена температурная зависимость темновой проводимости отожженной слоистой пленки

[†] E-mail: ormont@phys.msu.ru

$a\text{-Si:H}$ (кривая 4). Как и в случае стандартных пленок $a\text{-Si:H}$, она может быть описана экспонентой с энергией активации 0.97 эВ и предэкспоненциальным множителем $\sigma_0 = 7 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Равновесный уровень Ферми, рассчитанный по формуле Мотта

$$\sigma_d(T) = \sigma_{\min} \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

при $\sigma_{\min} = 200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, расположен при комнатной температуре на 0.82 эВ ниже дна зоны проводимости, что определяет электронный тип темновой проводимости исследованных пленок.

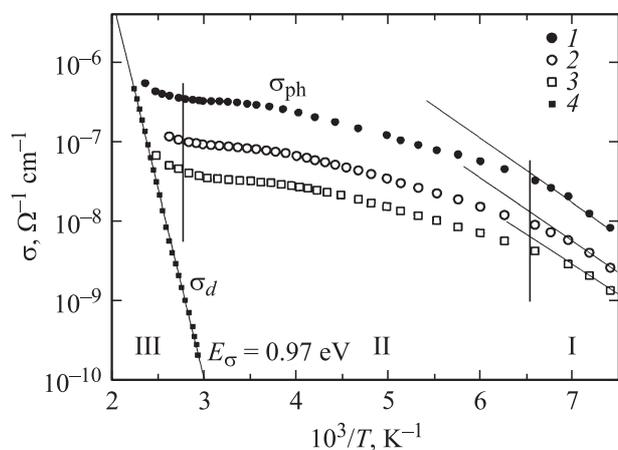


Рис. 1. Температурные зависимости темновой проводимости (4) и фотопроводимости слоистой пленки $a\text{-Si:H}$ (1–3) при межзонной генерации носителей ($2 < h\nu < 3.4 \text{ эВ}$) и при разных интенсивностях освещения пленки, мВт/см^2 : 1 — 2.5, 2 — 0.6, 3 — 0.02.

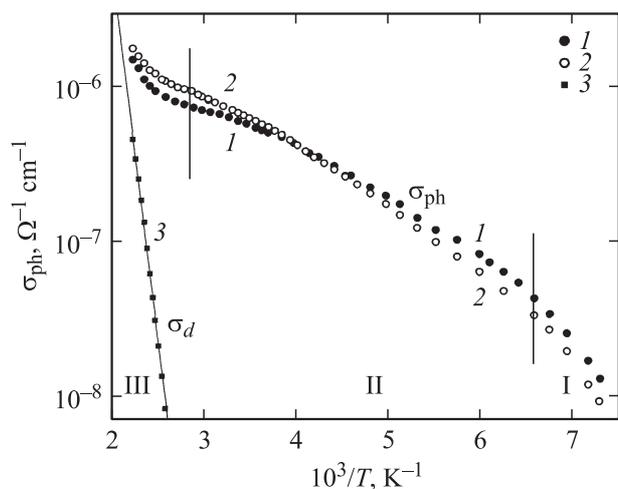


Рис. 2. Температурные зависимости темновой проводимости (3) и фотопроводимости пленки для межзонной (1) и смешанной (2) генерации носителей при одинаковой интенсивности освещения ($W = 4.3 \text{ мВт/см}^2$). 1 — $3.5 > h\nu > 2 \text{ эВ}$, 2 — $3.5 > h\nu > 1.5 \text{ эВ}$.

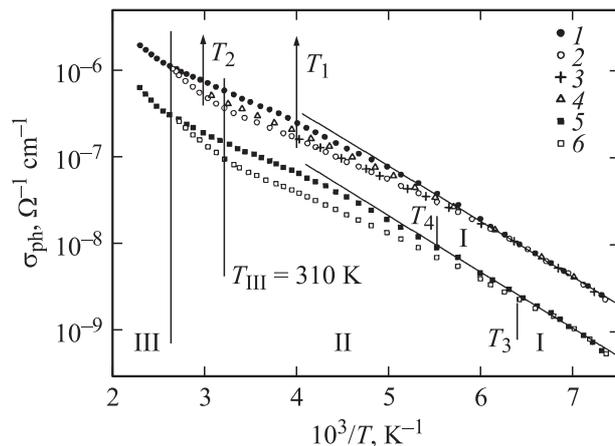


Рис. 3. Температурные зависимости фотопроводимости отожженной (1, 5) и предварительно освещенной при $T_{\text{III}} = 310 \text{ К}$ (2, 6) слоистой пленки при разной интенсивности освещения для смешанной генерации носителей ($1.9 > h\nu > 1.4 \text{ эВ}$), измеренные при непрерывном нагреве пленки. T_3, T_4 — температуры границы области I и области II для отожженной (5) и освещенной (6) пленки. Кривые 3 и 4 измерены при охлаждении освещенной пленки после ее нагрева соответственно до $T_1 < T_{\text{III}}$ и $T_2 > T_{\text{III}}$.

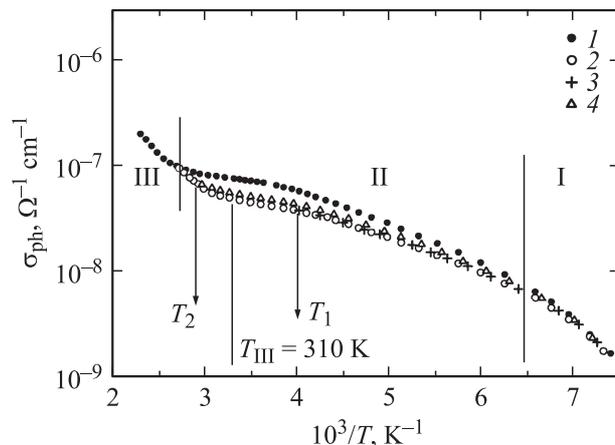


Рис. 4. Температурные зависимости фотопроводимости отожженной (1) и предварительно освещенной в течение 1 ч при $T_{\text{III}} = 310 \text{ К}$ пленки (2) для межзонной генерации носителей ($3.4 > h\nu > 2 \text{ эВ}$), измеренные при непрерывном нагреве пленки и при охлаждении освещенной пленки после ее нагрева до $T_1 < T_{\text{III}}$ (3) и до $T_2 > T_{\text{III}}$ (4).

На рис. 1–4 представлены температурные зависимости фотопроводимости отожженной и предварительно освещенной слоистой пленки $a\text{-Si:H}$ для разных типов генерации: межзонной, а также смешанной генерации с малой и с большой долей генерации электронов с уровней хвоста валентной зоны. Предварительно освещенные пленки имеют дополнительную концентрацию фотоиндуцированных метастабильных оборванных связей кремния.

Из рисунков видно, что температурные зависимости фотопроводимости при разных типах генерации носителей различны, однако для всех случаев генерации можно выделить три температурные области I, II и III.

I — область низких температур, где наблюдается практически одинаковый рост фотопроводимости с температурой, который можно описать экспонентой с энергией активации 0.13 эВ. Такая температурная зависимость фотопроводимости характерна при рекомбинации электронов на уровнях хвоста валентной зоны [6]. На рис. 3 приведены зависимости фотопроводимости для отожженной и предварительно освещенной пленки при смешанной генерации носителей. В освещенной пленке концентрация оборванных связей значительно больше из-за образования при освещении фотоиндуцированных оборванных связей. Одинаковая величина и температурная зависимость фотопроводимости в области низких температур показывают, что темп рекомбинации не зависит от концентрации оборванных связей.

Таким образом, рекомбинация электронов идет на уровнях хвоста валентной зоны, концентрация которых не изменяется при предварительном освещении.

II — область промежуточных температур, где рост фотопроводимости с температурой замедляется, что особенно заметно при межзонной генерации носителей (рис. 1). Это обусловлено увеличением темпа рекомбинации электронов на уровнях оборванных связей кремния из-за уменьшения их заполнения электронами [3]. При смешанной генерации носителей замедление роста фотопроводимости меньше, чем для межзонной, что связано с уменьшением рекомбинации на оборванных связях по сравнению с рекомбинацией на оборванных связях при межзонной генерации.

На рис. 2 приведены температурные зависимости фотопроводимости отожженной пленки для межзонной генерации (кривая 1) и смешанной с малой долей генерации электронов с уровней хвоста валентной зоны (кривая 2). Интенсивность освещения пленки в обоих случаях была одинакова, т. е. в случае смешанной генерации интенсивность межзонной генерации была меньше. Если бы генерация электронов с уровней хвоста валентной зоны не влияла на темп рекомбинации электронов, то кривая 2 была бы подобна кривой 1 и лежала несколько ниже, как это показано на рис. 1. Однако видно, что температурная зависимость фотопроводимости для смешанной генерации изменилась и величина фотопроводимости в области комнатных температур повысилась. Это указывает на уменьшение темпа рекомбинации электронов на уровнях оборванных связей вследствие увеличения их заполнения электронами.

На рис. 3 видно, что для смешанной генерации с большой долей генерации электронов с уровней хвоста валентной зоны температурная зависимость фотопроводимости слабо отклоняется от экспоненциальной зависимости. Это указывает на то, что рекомбинация на уровнях хвоста валентной зоны превышает рекомбинацию на оборванных связях вплоть до комнатных температур.

III — область высоких температур, где рост фотопроводимости пленки наблюдается для всех типов генерации носителей тока. Этот рост фотопроводимости обусловлен уменьшением темпа рекомбинации электронов на оборванных связях кремния вследствие их перезарядки с увеличением температуры.

Увеличение концентрации оборванных связей кремния в пленке путем предварительного ее освещения при комнатной температуре в течение 1 ч изменяет величину и температурную зависимость фотопроводимости и при смешанной, и при межзонной генерации носителей тока. Как отмечалось выше, в низкотемпературной области I величина и температурная зависимость фотопроводимости не изменяются, так как рекомбинация электронов идет на уровне хвоста валентной зоны, которая не зависит от концентрации оборванных связей. Уменьшение интенсивности освещения приводит к уменьшению фотопроводимости отожженной и предварительно освещенной пленки (рис. 3). При этом область I смещается к низким температурам вследствие увеличения рекомбинации электронов на уровнях оборванных связей из-за меньшего заполнения их электронами при уменьшении интенсивности.

В области II фотопроводимость предварительно освещенной пленки уменьшается как для случая межзонной генерации носителей, так и для случая смешанной генерации. Однако в области $T < T_{III}$ разница величин фотопроводимости отожженной и освещенной пленки растет с температурой, а при $T > T_{III}$ — уменьшается.

Исследования показали (рис. 3, 4), что при $T < T_{III}$ гистерезиса фотопроводимости нет. Это указывает на постоянство концентрации оборванных связей во время измерений вследствие малой скорости термической релаксации фотоиндуцированных оборванных связей в области этих температур. При постоянной концентрации оборванных связей темп рекомбинации электронов на них возрастает с температурой. Вследствие этого возрастает и разница величин фотопроводимости для отожженной и освещенной пленки. При $T > T_{III}$ наблюдается гистерезис фотопроводимости освещенной пленки, который обусловлен термической релаксацией фотоиндуцированных оборванных связей во время измерения. В результате этого разница фотопроводимости отожженной и освещенной пленки уменьшается.

4. Заключение

Установлено:

1. Величина фотопроводимости в широком интервале температур в исследованных слоистых пленках a -Si:H зависит от спектрального состава поглощаемого света, который определяет тип генерации носителей тока: межзонный или смешанный, включающий также генерацию электронов с уровней хвоста валентной зоны. Эта зависимость фотопроводимости обусловлена изменением темпов рекомбинации электронов на уровнях

оборванных связей кремния и хвоста валентной зоны вследствие разного заполнения их электронами при межзонной и смешанной генерации носителей.

2. При смешанной генерации носителей уменьшается темп рекомбинации электронов на уровнях оборванных связей кремния вследствие увеличения их заполнения электронами. В результате этого в слоистой пленке $a\text{-Si:H}$, имеющей малую концентрацию врожденных оборванных связей кремния, рекомбинация электронов на уровнях хвоста валентной зоны преобладает вплоть до комнатных температур.

3. Увеличение концентрации оборванных связей кремния путем предварительного освещения пленки обуславливает изменение величины и температурной зависимости фотопроводимости вследствие увеличения рекомбинации на уровнях оборванных связей. В результате область преимущественной рекомбинации на уровнях хвоста валентной зоны смещается к низким температурам.

Авторы выражают благодарность проф. В.П. Афанасьеву за предоставление слоистых пленок $a\text{-Si:H}$.

Список литературы

- [1] В.П. Афанасьев, Ф.С. Гудовских, О.И. Коньков, М.М. Казанин, К.В. Коугия, А.А. Сазонов, И.Н. Трапезникова, Е.И. Теруков. ФТП, **34**, 492 (2000).
- [2] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт, Е.И. Теруков, И.Н. Трапезникова, В.П. Афанасьев, А.С. Гудовских. ФТП, **35**, 367 (2001).
- [3] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт. ФТП, **44**, 1624 (2010).
- [4] M.Q. Tran. Phil. Mag. B, **72** (1), 35 (1995).
- [5] A. Merazga, S. Tobbeche, C. Main, A. Al-Shahrani, S. Reynolds. J. Phys. : Condens. Matter, **18**, 3721 (2006).
- [6] S. Tobbeche, A. Merazga. Revue des Renouvelables, **10** (1), 57 (2007).

Редактор Т.А. Полянская

About peculiarities of recombination processes at $a\text{-Si:H}$ layered films

I.A. Kurova, N.N. Ormont

Moscow State University,
Faculty of Physics,
119992 Moscow, Russia

Abstract The absorbed light spectral composition determines the generation type — interband or mixed generation that also includes the electron generation from the valence band tail. The generation type impacts on magnitude and temperature dependence of the recombination rate of electrons in $a\text{-Si:H}$ layered films. This influence is caused by the electron occupation number changing of silicon dangling bonds levels and valence tail levels as the generation types changes. As a result in the case of mixed generation in investigated layered films with low concentration of native dangling bonds the electron recombination on dangling bonds is small and electron recombination on the valence band tail levels may prevail up to the room temperatures.