

©1994 г.

## ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ , ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

*В.Х.Кудоярова, Е.И.Теруков, И.Н.Трапезникова, Г.Н.Виолина,  
Н.В.Ельжина, Р.А.Кавалаяскас*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 24 ноября 1993 г. Принята к печати 7 декабря 1993 г.)

Проведено комплексное исследование оптических, структурных и электрических свойств слоев аморфного гидрогенизированного карбида кремния  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  в диапазоне составов, соответствующих  $0 < x < 0.5$ , приготовленного из смесей  $\text{CH}_4 + \text{SiH}_4 + \text{Ar}/\text{H}_2$  в плазме высокочастотного тлеющего разряда. Исследование этих твердых растворов проводится с целью их использования в электрофотографии. Показано, что аморфный гидрогенизированный карбид кремния может быть использован в многослойных электрофотографических слоях в качестве блокирующего слоя (что дает возможность осуществить бизарядный режим записи информации), пассивирующего слоя (что позволяет улучшить процесс накопления заряда на поверхности), слоя переноса заряда. В работе оптимизированы режимы получения  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  для каждого из слоев, а также осуществлена приборная (практическая) реализация полученных результатов, т. е. получены электрофотографические оттиски.

### 1. Введение

Наряду с использованием селена и сплавов на его основе в качестве носителя информации (фотоприемника) в последнее время ведутся интенсивные исследования по созданию электрофотографических слоев (ЭФС) на основе  $a\text{-Si:H}$ . Такие ЭФС, нанесенные на алюминиевые цилиндры копировальных устройств, обладают целым рядом преимуществ: большой срок службы, возможность получения высокой фоточувствительности во всей видимой области спектра и даже в инфракрасном (ИК) диапазоне, высокая температурная стабильность, дающая возможность реализовать высокие скорости при работе и компактную конструкцию копировального устройства [1]. Перечисленные достоинства делают перспективными исследования аморфных тетраэдрических сплавов на основе  $a\text{-Si:H}$  для фотоприемников, применяемых в дешевых малогабаритных высокоскоростных копировальных устройствах. Вместе с тем при их создании возникает ряд проблем.

Известно, что для формирования скрытого изображения по методу Карлсона (C.F. Carlson) [2] необходим потенциал поверхностного заряда  $U_c = 300-900$  В. При этом общая продолжительность процессов, а именно процесса накопления заряда на поверхности изолирующего фотопроводника и процесса фотозатухания поверхностного заряда при оптическом воздействии, составляет несколько секунд. Для этого толщина фотоприемника должна быть не менее 10 мкм, а удельное сопротивление порядка  $10^{13}$  Ом·см. Поэтому для применения  $a\text{-Si:H}$  в качестве ЭФС должны быть разработаны методы быстрого осаждения (5-8 мкм/ч) и методы увеличения удельного сопротивления слоев  $a\text{-Si:H}$  по крайней мере на 2-3 порядка (обычно удельное сопротивление  $a\text{-Si:H}$  составляет  $\sim 10^{10}$  Ом·см). Получение такого материала представляет собой нетривиальную задачу, поскольку увеличение удельного сопротивления, как правило, влечет за собой падение величины фотопроводимости.

Наиболее распространенным методом получения  $a\text{-Si:H}$  является в настоящее время метод высокочастотного разложения силановых смесей ( $\text{SiH}_4 + \text{Ag} + \text{H}_2$ ). Используются два способа получения высокоомных пленок на основе  $a\text{-Si:H}$ . В одном из них  $a\text{-Si:H}$  с удельным сопротивлением, большим  $10^{10}$  Ом·см, получают, легируя бором и кислородом [3]. В другом — высокоомность достигается увеличением содержания дигидридных групп  $(\text{SiH}_2)_n$  в пленках за счет понижения температуры подложки  $T_s$  и увеличения удельной мощности высокочастотного разряда [4]. Высокие скорости осаждения (5-8 мкм/ч) осуществляются при использовании силановой смеси, разбавленной водородом [5]. Однако реализовать большую часть требований к ЭФС в рамках однослойной структуры оказывается затруднительным [6].

В настоящее время разрабатывается и другой подход, заключающийся в создании многослойных структур на основе  $a\text{-Si:H}$ , состоящих из поверхностного пассивирующего слоя (ПС), слоя генерации заряда (СГЗ), слоя переноса заряда (СПЗ) и базового блокирующего слоя (БС) [7-11]. Каждый слой выполняет предназначенную ему функцию, при этом возможны различные варианты сочетания таких тетраэдрических аморфных полупроводников, как  $a\text{-Si:H}$ ,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$  и  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ . Выбор вариантов сочетания аморфных тетраэдрических слоев в структуре ЭФС определяется технической реализацией процесса записи информации: спектральным диапазоном источника света, моно- или биполярным напряжением заряда поверхности ( $U_c$ ).

При этом ПС должен обладать несколькими основными характеристиками: высокой твердостью в сочетании с антифрикционными свойствами, высокой прозрачностью в спектральной области чувствительности фотоприемника, высоким удельным сопротивлением ( $\rho > 10^{13}$  Ом·см) для исключения стекания нанесенного поверхностного заряда. Материал для СПЗ должен иметь высокую подвижность носителей заряда (отношение фотопроводимости к темновой проводимости должно составлять  $\sigma_{ph}/\sigma_d = 10^4 \div 10^5$ ). БС должен препятствовать инжекции носителей заряда в СПЗ из алюминиевой подложки (цилиндра).

Привлекательность использования  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  в качестве ЭФС в электрофотографии заключается в возможности получения составов,

обладающих широким набором электрофизических свойств, из которых могут быть выбраны оптимальные составы для ПС, СПЗ и БС. Одним из способов изменения состава пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  является использование различных смесей газов (силана с метаном, этиленом и т.д.), варьирование их соотношения и использование различных газов-разбавителей. Однако каждая конкретная реализация необходимых свойств для ПС, СПЗ и БС требует оптимизации составов слоев и условий их получения.

В представленной работе проведено исследование влияния состава газовых смесей и температуры подложки  $T_s$  (при прочих равных условиях) на электрофизические свойства пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ . Были использованы две смеси,  $(\text{SiH}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar} + \text{H}_2)$  и  $(\text{SiH}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar})$ , при этом температура подложки составляла 230 и 250 °С соответственно. Показано, что разбавление смеси водородом («бедная» смесь) позволяет получить изменение электрофизических свойств слоев  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  преимущественно за счет встраивания углерода в сетку  $a\text{-Si:H}$ . Используя такую смесь, удастся получить составы ( $x < 0.2$ ), обладающие хорошими оптоэлектронными характеристиками ( $\sigma_{ph}/\sigma_d = 10^4$ ) и высокой темновой электропроводностью ( $\sigma_d \approx 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ), удовлетворяющие требованиям для СПЗ. Неразбавленная водородом смесь («богатая» смесь) позволяет получить высокоомные слои с  $\sigma_d < 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  в основном за счет увеличения концентрации водорода, который входит в пленки  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  через метиловые группы  $(\text{Si}-\text{CH}_3)$ . Используя богатую смесь, можно получить составы ( $x \leq 0.4$ ), удовлетворяющие требованиям для ПС и БС.

Кроме того, нами получены и исследованы ЭФС, где высокоомный  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  ( $x \leq 0.4$ ) используется в качестве ПС и БС, а менее высокоомный  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  ( $x < 0.2$ ) — в качестве СПЗ. Многослойные ЭФС наносились как на алюминиевые плоские подложки площадью 25 см<sup>2</sup> (текстовые структуры), так и на алюминиевый цилиндр копировального устройства. В работе приводятся некоторые параметры полученных ЭФС: максимальный потенциал зарядки  $U_c$ , поле зарядки  $E = U_c/d$  ( $d$  — толщина транспортного слоя), время полуспада потенциала в темноте  $t_{1/2}^d$  и при освещении  $t_{1/2}^{ph}$ , интегральная фоточувствительность по полуспаду потенциала  $S_{1/2}$  [12]. На многослойных тестовых ЭФС, выращенных на алюминиевых подложках, а также ЭФС, напыленных на алюминиевый цилиндр копировального устройства, были получены образцы печати.

## 2. Экспериментальные методики

Концентрация углерода  $x$  в пленках  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  определялась с помощью оже-спектроскопии и метода рентгеновского спектрального анализа. ИК спектроскопия позволила определить характер химической связи атомов, входящих в состав пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ . ИК спектры снимались при комнатной температуре на двулучевом спектрометре UR-20, при этом в измерительный канал помещалась пленка  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  на подложке из кристаллического высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости, а в канал сравнения — подложка. Для основных

наблюдаемых полос поглощения рассчитывалось интегральное поглощение  $I = \int [\alpha(\nu)/\nu] d\nu$ , где  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $\nu$  — волновое число. Там, где наблюдаемая полоса поглощения представляла суперпозицию нескольких полос, производилось ее разложение на составляющие. При этом предполагалось, что составляющие полосы имеют гауссову форму. Концентрация связей ( $\equiv \text{Si-H}$ ,  $\equiv \text{Si-CH}_3$ ,  $\equiv \text{C-H}$ ) определялась путем умножения интегрального поглощения  $I$  на силу осциллятора  $A_{w,s}$  соответствующего колебания:  $N = A_{w,s} \cdot I$ . Силы осцилляторов, как правило, определяются из независимых измерений и составляют следующие величины: для мод вращательных колебаний связей  $\text{Si-H}$  и  $\text{Si-CH}_3$   $A_w = 1.6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  [13] и  $A_w = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  [14], для мод колебаний растяжения связей  $\text{Si-H}$  и  $\text{C-H}$   $A_s = 1.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  [15] и  $A_s = 1.7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$  [16] соответственно.

Край оптического поглощения  $\alpha(\hbar\omega)$  исследовался на двулучевом спектрометре фирмы «Hitachi». В измерительный канал помещалась исследуемая пленка на кварцевой подложке, а в канал сравнения — кварцевая подложка. Оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g^{\text{opt}}$  определялась экстраполяцией экспериментальной кривой до пересечения с осью абсцисс в соответствии с зависимостью  $(\alpha\hbar\omega)^{1/2} = B(\hbar\omega - E_g^{\text{opt}})$ . Исследовались темновая проводимость и интегральная по спектральному диапазону фотопроводимость при комнатной температуре. Облучение производилось ртутной лампой через фильтр СЗС-23, при этом интенсивность облучения составляла  $10^{16} - 10^{17} \text{ кв./см}^2$ .

Спектры фотолюминесценции снимались при возбуждении аргоновым лазером с  $\hbar\omega = 2.54 \text{ эВ}$ . Измерения проводились на монохроматоре МДР-2, регистрация сигнала осуществлялась с помощью фотумножителя ФЭУ-62.

Концентрационные профили распределения и общее количество водорода в пленках  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  исследовались путем наблюдения спектров протонов отдачи при облучении пленок ускоренными ионами азота  $\text{N}^{3+}$  с энергией  $10.5 \text{ МэВ}$  [17].

Для характеристики ЭФС измерялись следующие параметры: максимальный потенциал зарядки  $U_c$ , поле зарядки  $E = U_c/d$  ( $d$  — толщина транспортного слоя), время полуспада потенциала в темноте  $t_{1/2}^d$  и при освещении ( $\lambda = 0.78 \text{ мкм}$ )  $t_{1/2}^{ph}$ , интегральная фоточувствительность по полуспаду потенциала  $S_{1/2}$ . Подробное описание методик измерения этих параметров приводится в [12].

### 3. Экспериментальные результаты

Исследование содержания углерода в твердой фазе  $x$  в зависимости от состава газовой смеси  $y = [\text{CH}_4]/[\text{CH}_4 + \text{SiH}_4]$  показало, что для бедной смеси характерна слабая линейная зависимость  $x$  от  $y$  вплоть до  $y = 0.8$  и более резкая при  $y > 0.8 - 1.0$  (рис. 1). По мере увеличения  $x$  происходят изменения в характере химического связывания атомов, входящих в состав пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ , которые проявляются в ИК спектрах (рис. 2). В них наблюдаются 4 основные полосы поглощения, связанные с различными модами колебаний: 1 — мода качания связи

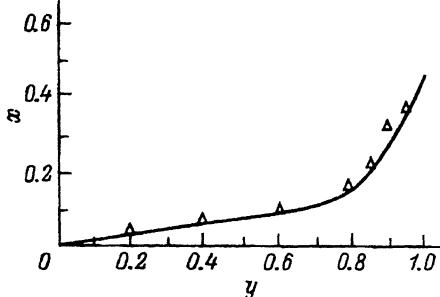


Рис. 1. Содержание углерода  $x$  в пленках  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  в зависимости от состава газовой смеси  $y = [\text{CH}_4]/[\text{CH}_4 + \text{SiH}_4]$ .

Si-H ( $630\text{ см}^{-1}$ ), 2 — мода растяжения связи Si-C ( $670\text{ см}^{-1}$ ), 3 — мода качания связи Si-CH<sub>3</sub> ( $780\text{ см}^{-1}$ ) и 4 — мода растяжения связи Si-H ( $2000\text{--}2100\text{ см}^{-1}$ ) [18]. Интегральное поглощение каждой полосы зависит от состава пленки, т.е.  $x$ . Из рис. 2 следует, что с увеличением  $x$  интенсивность полосы 1 уменьшается, в то время как интенсивности полос 2 и 3 растут. Характерной особенностью ИК спектров образцов, полученных на основе бедной смеси, является полное отсутствие или слабая интенсивность полосы поглощения при  $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ , которая приписывается моде растяжения связи C-H [18]. Волновое число  $\nu_{\text{max}}$ , соответствующее положению максимума полосы 4, изменяется от  $2000$  до  $2095\text{ см}^{-1}$  (рис. 2, вставка). Известно [15], что наличие расположенных по соседству с атомом Si атомов C, обладающих сильной электроотрицательностью, может привести к сдвигу максимума полосы поглощения 4 в область больших волновых чисел. Расчет степени влияния соседних атомов углерода на частоту колебаний Si-H и Si-H<sub>2</sub>, связанных с одним, двумя и тремя атомами углерода, приведен в ра-

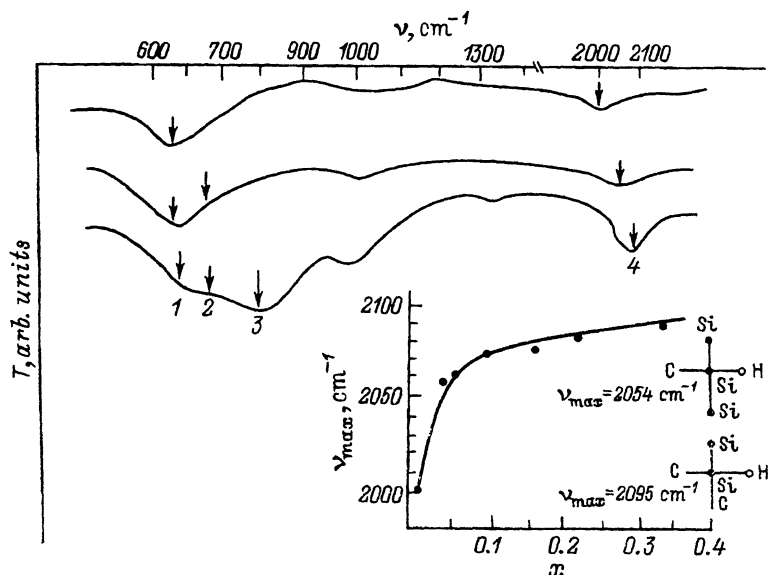


Рис. 2. ИК спектры пропускания  $T$  образцов  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  с  $x = 0, 0.16, 0.32$  (сверху вниз).

На вставке — сдвиг полосы поглощения 4, связанной с модой растяжения связи Si-H в зависимости от содержания углерода.

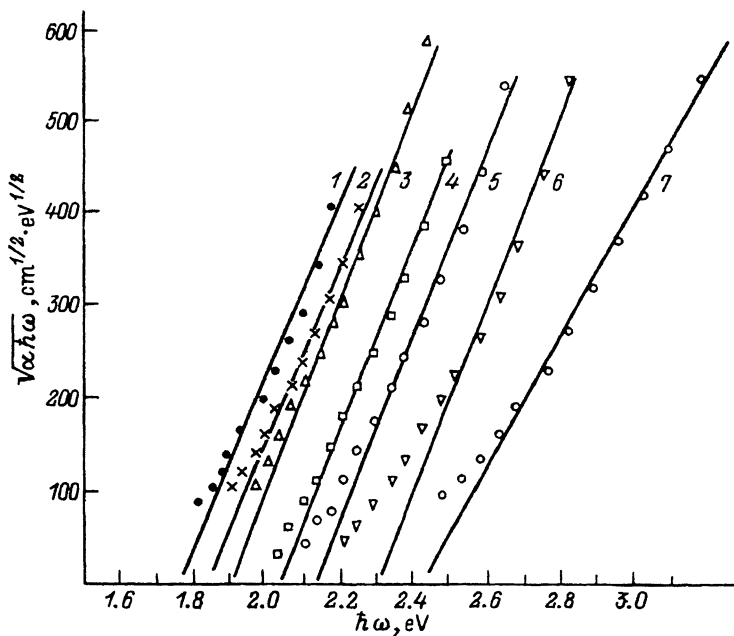


Рис. 3. Зависимости  $(\alpha \hbar \omega)^{1/2} = f(\hbar \omega)$  для пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  с различным содержанием углерода  $x$ : 1 — 0, 2 — 0.044, 3 — 0.088, 4 — 0.156, 5 — 0.21, 6 — 0.325, 7 — 0.34.

боте [19]. Сопоставляя наблюдаемый нами сдвиг полосы поглощения  $2000\text{-cm}^{-1}$  с расчетами, проведенными в [19], можно сделать вывод о том, как встраивается углерод, замещая атомы Si. В условиях бедной смеси при увеличении  $x$  наблюдается постепенный переход от колебаний моды растяжения ( $\equiv \text{Si-H}$ ), где атом Si связан с одним атомом углерода ( $2054\text{ cm}^{-1}$ ), к колебаниям моды растяжения ( $\equiv \text{Si-H}$ ), где атом Si связан с двумя атомами углерода ( $2095\text{ cm}^{-1}$ ).

На рис. 3 приведены спектры в координатах Таупа [ $(\alpha \hbar \omega)^{1/2} = B(\hbar \omega - E_g^{\text{opt}})$ ] для серии образцов  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  с различным содержанием углерода  $x$ . Как видно из рис. 3, оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g^{\text{opt}}$  растет с увеличением  $x$  от 1.75 до 2.4 эВ и эта зависимость может быть представлена в виде  $E_g^{\text{opt}}(x) = E_g^{\text{opt}}(0) + 1.68x$  (рис. 4). Наблюдается хорошее совпадение с результатами работ [20,21]. Обращает на себя внимание тот факт, что коэффициент пропорциональности  $B$ , характеризующий наклон зависимостей  $(\alpha \hbar \omega)^{1/2} = f(\hbar \omega)$ , при небольших добавках углерода к  $a\text{-Si:H}$  ( $x < 0.1$ ) увеличивается по сравнению со значением  $B$  для  $a\text{-Si:H}$ , а затем при  $x = 0.37$  уменьшается. Этот факт свидетельствует о том, что малые добавки углерода ( $x < 0.1$ ) улучшают интересные параметры исходного  $a\text{-Si:H}$ .

В общем случае увеличение  $E_g^{\text{opt}}$  может быть связано как с увеличением числа связей Si-C, т.е. эффектом сплавления, так и с увеличением концентрации водорода в пленках. Увеличение содержания  $\text{CH}_4$  в газовой смеси (или содержания углерода  $x$  в пленке) приводит к умень-

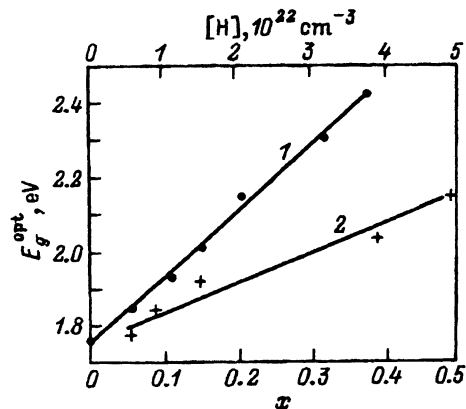


Рис. 4. Зависимость оптической ширины запрещенной зоны  $E_g^{\text{opt}}$  от содержания углерода  $x$  (1) и концентрации водорода  $[H]$  (2) в образцах  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ .

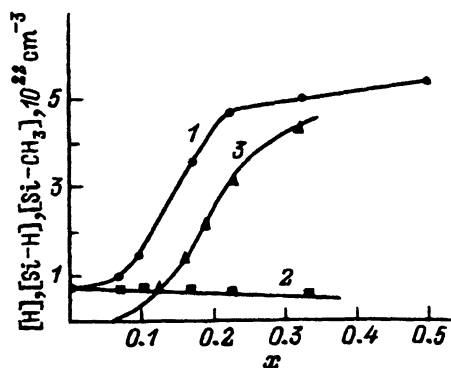


Рис. 5. Зависимость общей концентрации водорода (1) и количества связей Si-H (2) и Si-CH<sub>3</sub> (3) от содержания углерода  $x$ .

шению количества водорода, связанного с атомами кремния (Si-H), и к увеличению количества водорода, входящего в пленки посредством метиловых групп (Si-CH<sub>3</sub>). Несмотря на то что количество последнего возрастает начиная с  $x = 0.2$ , общее содержание водорода, определенное методом протонов отдачи, при этих значениях  $x$  начинает замедлять свой рост, выходя на насыщение (рис. 5). По-видимому, в случае использования бедной (разбавленной аргоном и водородом) смеси увеличение  $E_g^{\text{opt}}$  связано с преимущественным увеличением концентрации связей Si-C, а не с ростом концентрации водорода (рис. 4). Основанием так считать служит увеличение количества встраиваемых в аморфную сетку атомов углерода, которое проявляется в увеличении интенсивности полосы поглощения  $670\text{ см}^{-1}$  (мода растяжения связи Si-C), в сдвиге полосы поглощения  $2000$  к  $2095\text{ см}^{-1}$  (мода растяжения связи Si-H) за счет увеличения количества замещений атомов Si атомами C. Таким образом, проведенные исследования показали возможность получения при использовании бедной смеси составов, обладающих широким набором значений оптической ширины запрещенной зоны от  $1.75$  до  $2.4$  эВ.

Известно [18], что в сплавах  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  увеличение  $x$  может приводить к росту дефектности, вызванному композиционным и структурным беспорядком, и, как следствие, к возрастанию плотности локализованных состояний в хвостах разрешенных зон, которые в свою очередь контролируют протекание практически всех неравновесных процессов. В образцах  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ , полученных в условиях бедной смеси, протяженность хвоста плотности состояний зоны проводимости  $\Delta E_c$  при увеличении  $x$  от 0 до 0.37 изменяется в 1.1 раз по сравнению с  $\Delta E_c$  для  $a\text{-Si:H}$ , о чем свидетельствует поведение коэффициента пропорциональности  $B$  в зависимости Тауца (рис. 6). Он обратно пропорционален произведению  $n\Delta E_c$ , где  $n$  — показатель преломления, а  $\Delta E_c$  — энергетическая протяженность хвоста плотности состояний зоны проводимости [22]. При изменении  $x$  от 0 до 0.37 коэффициент  $B$  увели-

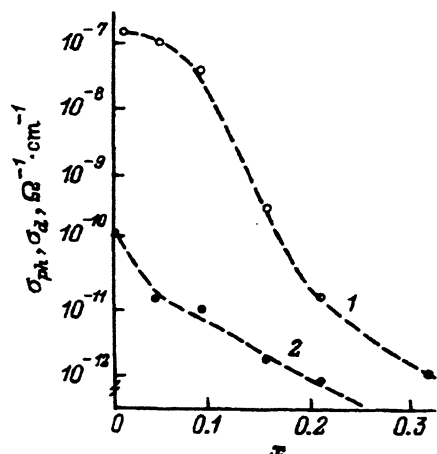
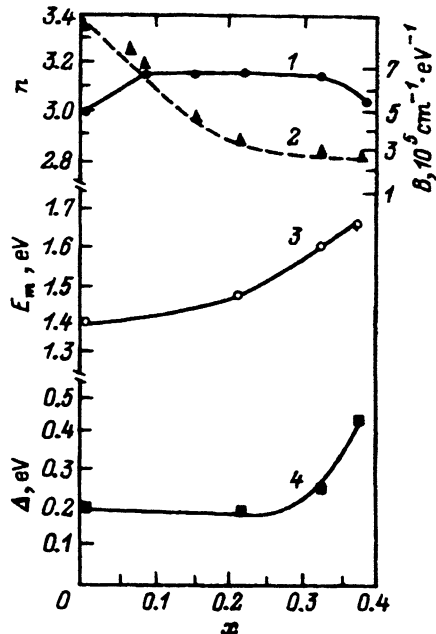


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $B$  (1), коэффициента преломления  $n$  (2), положения максимума ФЛ  $E_m$  (3) и ширины линии ФЛ на полувысоте  $\Delta$  (4) от содержания углерода.

Рис. 7. Зависимость интегральной фотопроводимости (1) и темновой электропроводности (2) пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  от содержания углерода  $x$ .

чивается от  $5.14 \cdot 10^5$  до  $5.5 \cdot 10^5 \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , в то время как показатель преломления  $n$  уменьшается от 3.34 до 2.8 (рис. 6).

Проведенные исследования фотолюминесценции (ФЛ) свидетельствуют о гомогенности полученных пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  (наблюдается один симметричный пик ФЛ). При увеличении  $x$  изменяются положение максимума ФЛ и ширина линий на полувысоте (рис. 6): спектры ФЛ сдвигаются в область больших энергий и расширяются. Считается, что наблюдаемые изменения спектров ФЛ при увеличении  $x$  происходят из-за возрастания беспорядка и увеличения плотности дефектов [23,24]. В нашем случае небольшое изменение ширины спектра ФЛ в слоях с  $x > 0.21$  по сравнению с  $a\text{-Si:H}$  свидетельствует о некотором уширении хвостов плотности состояний.

Изменение состава газовой смеси (и, значит, изменение  $x$ ) приводит к изменению темновой проводимости и интегральной фотопроводимости (рис. 7). Как видно из рис. 7, введение небольших добавок углерода ( $x < 0.1$ ) приводит к улучшению интересующих параметров исходного  $a\text{-Si:H}$ : уменьшению темновой проводимости (увеличению удельного сопротивления  $\rho$  приблизительно на 2 порядка) и увеличению отношения  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  до  $10^4$ .

Выше упоминалось о том, что СПЗ в многослойном ЭФС должен обеспечить высокую подвижность носителей тока, которая осуществи-



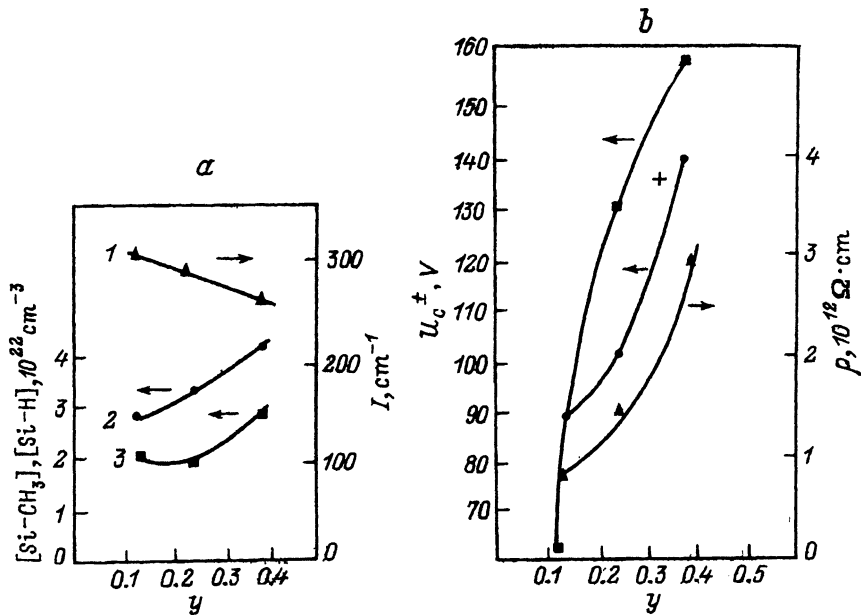
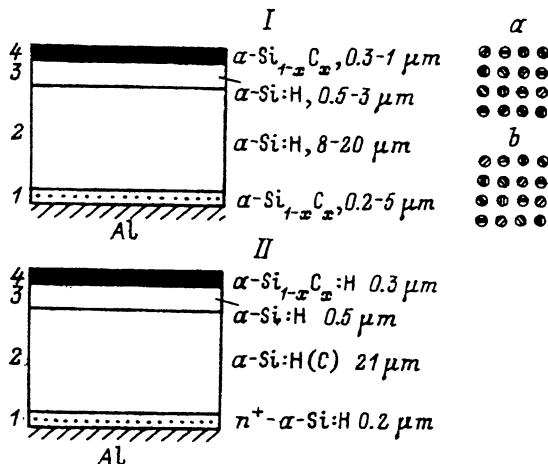


Рис. 8. а — зависимость интеграла поглощения, обусловленного модой растяжения связи Si-C (1), концентрации связей Si-CH<sub>3</sub> (2) и Si-H (3) от состава газовой смеси  $y$ . б — зависимость максимальных потенциалов зарядки  $U_c^-$ ,  $U_c^+$  и удельного сопротивления  $\rho$  тестовых пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  от состава газовой смеси  $y$ .

ма при малой плотности состояний в хвостах зон. Исследования показали, что при использовании бедной смеси состава с  $x < 0.21$  отвечают этому требованию и могут быть использованы в качестве СПЗ в ЭФС. Слои  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ , используемые в качестве ПС и БС, должны обладать удельным сопротивлением  $\rho \gtrsim 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Для повышения удельного сопротивления слои  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  для ПС и БС изготавливались из богатой (неразбавленной водородом) смеси ( $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar}$ ). Состав газовой смеси  $y = [\text{CH}_4]/[\text{CH}_4 + \text{SiH}_4]$  изменялся от 0.13 до 0.5, температура подложки составляла  $T_s = 250^\circ\text{C}$ .

Тестовые слои  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ , приготовленные указанным способом напылялись как на кремниевые и кварцевые, так и на алюминиевые подложки. Толщины этих слоев составляли 2–5 мкм. На рис. 8,а приведены зависимости интегрального поглощения  $I$  в полосе  $670 \text{ см}^{-1}$ , связанной с модой растяжения связи Si-C, и концентрации связей Si-H и Si-CH<sub>3</sub> в зависимости от состава газовой смеси  $y$ . Как видно из рис. 8,а, увеличение  $y$  приводит к возрастанию концентрации связей Si-H и Si-CH<sub>3</sub>, т.е. к увеличению концентрации водорода, в то время как интегральное поглощение  $I$  в полосе, связанной с модой растяжения связи Si-C, уменьшается в 1,2 раз. Сопоставление зависимостей удельного сопротивления  $\rho$ , максимальных потенциалов зарядки  $U_c^-$  и  $U_c^+$  тестовых слоев  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  и концентрации связей Si-H и Si-CH<sub>3</sub> от состава газовой смеси  $y$  показывает (рис. 8,б), что увеличение удельного сопротивления коррелирует с увеличением концентрации водорода в пленках. Как и в случае  $a\text{-Si:H}$ , повышение удельного сопротивления

Рис. 9. Схематическое изображение многослойных структур для ЭФС двух типов. 1 — блокирующий слой, 2 — слой переноса заряда, 3 — слой генерации заряда, 4 — пассивирующий слой. *a, b* — электрофотографические оттиски, полученные со структуры I соответственно при положительном и отрицательном поверхностном потенциале зарядки при увеличении в 280 раз.



( $\rho > 10^{12}$  Ом·см) достигается за счет увеличения концентрации водорода. Таким образом, полученные при использовании богатой смеси слой  $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  могут быть использованы в качестве ПС и БС.

Итак, в результате проведенного исследования удалось оптимизировать условия получения и установить составы пленок  $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ , пригодные для использования в качестве СПЗ, ПС и БС. Нами получены и исследованы также многослойные ЭФС двух типов (рис. 9). Исследуемые структуры типов I и II содержат блокирующий слой, слой переноса заряда, слой генерации заряда и пассивирующий слой. Структура типа I наносилась на алюминиевые плоские подложки площадью 25 см<sup>2</sup>. В ней использовался широкозонный  $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  ( $E_g^{\text{opt}} = 2.3\text{--}2.4$  эВ,  $x \simeq 0.3$ ) в качестве БС и ПС; СПЗ и СГС служили слои  $\alpha\text{-Si:H}$ , полученные в несколько различных режимах роста. Толщина полученных многослойных ЭФС составляла от 8 до 30 мкм. Такие структуры заряжались отрицательным ( $U_c^-$ ) и положительным ( $U_c^+$ ) поверхностным потенциалом, т.е. осуществлялся бизарядный режим записи. Структура типа I, толщиной 26 мкм, заряжалась до максимальных поверхностных потенциалов  $U_c^+ = 440$  В и  $U_c^- = 620$  В. Характерные времена полуспада потенциала в темноте  $t_{1/2}^d$  и интегральная фоточувствительность по полуспаду потенциала  $S_{1/2}$  равнялись соответственно  $t_{1/2}^d = 6$  с,  $S_{1/2} = 0.01$  лк<sup>-1</sup> (при положительной зарядке) и  $t_{1/2}^d = 8$  с,  $S_{1/2} = 0.02$  лк<sup>-1</sup> (при отрицательной зарядке). На этих структурах были получены электрофотографические копии с хорошим контрастом как при положительном, так и при отрицательном поверхностном потенциале зарядки. На рис. 9, *a, b* приводятся соответствующие фрагменты и изображения мира, увеличенные в 280 раз. Аналогичного качества изображение было получено при увеличении в 960 раз. Структура типа II, толщиной 22 мкм, была нанесена на алюминиевый цилиндр диаметром 30 мм и длиной 260 мм (используемый в стандартном лазерном принтере типа «Laser-Jet»). Нанесение слоев производилось в разработанной нами установке высокочастотного разложения газовых смесей в тлеющем разряде с коаксиальной конфигурацией

реактора. В структуре типа II в качестве БС использовался легированный слой  $n^+ - a\text{-Si:H}$  ( $[\text{PH}_3] \approx 2.5 \cdot 10^{-2}\%$ ); СПЗ служил слой  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  ( $x < 0.1$ ,  $E_g^{\text{opt}} = 1.9 \text{ эВ}$ ); в качестве СГЗ был взят  $a\text{-Si:H}$  и ПС — слой  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  ( $x \approx 0.4$ ,  $E_g^{\text{opt}} = 2.4 \text{ эВ}$ ). Такая структура заряжалась отрицательным ( $U_c^- = 600 \text{ В}$ ) и положительным ( $U_c^+ = 320 \text{ В}$ ) поверхностным потенциалом зарядки, т.е. осуществлялся бизарядный режим записи. Напряженность поля зарядки  $E$  равнялась  $2.73 \cdot 10^5$  и  $1.45 \cdot 10^5 \text{ В/см}$  соответственно. Характерные времена полуспада потенциала (при положительной зарядке) в темноте  $t_{1/2}^d$  и при засветке на длине волны инжекционного лазера ( $\lambda = 0.78 \text{ мкм}$ )  $t_{1/2}^{ph}$  равнялись 10 и 4.7 с соответственно. Если принять во внимание диаметр цилиндра 30 мм и скорость вращения 50 мм/с, то оказывается, что наблюдаемые времена полуспада напряжения вполне удовлетворяют требованиям для получения изображения. Была получена запись изображения с помощью такого цилиндра, установленного в стандартный принтер японского производства [10].

В заключение авторы выражают благодарность Е. Мусабекову за исследование спектров ФЛ пленок  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ .

Работа выполнена при поддержке Министерства обороны США.

#### Список литературы

- [1] I. Shimizu. *Semiconductors and Semimetals* (1984) v. 21, part D, p. 55.
- [2] Р. Шафферт. *Электрофотография* (М., Мир, 1968) с. 20.
- [3] N. Jamamoto, Y. Nakayama, K. Wakita, M. Nakano, T. Kawama. *Japan. J. Appl. Phys., Suppl.* **20-1**, 305 (1981).
- [4] K. Wakita, et al. *Photogr. Sci. Eng.*, **26**, 183 (1982).
- [5] J.C. Knights, R.A. Lujan, R.A. Street, D.K. Biegelson. *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 331 (1981).
- [6] I. Shimizu, T. Komatsu. *Photogr. Sci. Eng.*, **24**, 251 (1980).
- [7] I. Shimizu, T. Komatsu, K. Saito, E. Inoue. *J. Non-Cryst. Sol.*, **35-36**, 773 (1980).
- [8] Y. Nakayama, S. Akita, K. Wakita, M. Nakano, T. Kawamura. *Electrophotography*, **27**, 41 (1988).
- [9] Н.В. Елькина, Р.А. Кавалюскас, В.И. Марахонов, В.В. Жданова, Е.И. Теруков. *Тез. докл. совещ. сем. «Аморфные полупроводники и диэлектрики на основе a-Si»* (Одесса, 1989) с. 48.
- [10] В.Х. Кудоярова, Р.А. Кавалюскас, О.И. Коньков, Е.И. Теруков, И.Н. Тразезникова, И.В. Шведков. *Тез. докл. междунар. конф. по электрофотографии* (М., 1991) с. 46.
- [11] Л.А. Балагуров, Н.Ю. Карпова, О.Е. Коробов, А.Н. Лупачева, П.Н. Морозкин, Н.Б. Смирнов. *Тез. докл. междунар. конф. по электрофотографии* (М., 1991) с. 95.
- [12] Г.С. Грешинин. *Электрофотографический процесс* (М., Наука, 1970) с. 277.
- [13] H. Schanks, C.J. Fang, L. Ley, M. Cardona, F.J. Demond, S. Kalbitzer. *Phys. St. Sol. (b)*, **100**, 43 (1980).
- [14] V.Kh. Kudoyarova, G.M. Gusinsky, L.A. Rassadin, I.V. Kudryavtsev. *Appl. Surf. Sci.*, **50**, 173 (1991).
- [15] H. Weider, M. Cardona, C.R. Guarnieri. *Phys. St. Sol. (b)*, **92**, 99 (1979).
- [16] K. Nakazawa, S. Veda, M. Kumeda, A. Marimoto, T. Scimizu. *Japan. J. Appl. Phys.*, **21**, L176 (1982).
- [17] G.M. Gusinskii, I.V. Kudryavtsev, V.Kh. Kudoyarova, V.O. Naidenov, L.A. Rassadin. *Semicond. Sci. Techn.*, **7**, 881 (1992).
- [18] J. Bullot, M.P. Schmidt. *Phys. St. Sol. (b)*, **143**, 345 (1987).
- [19] G. Lucovsky. *Sol. St. Commun.*, **29**, 571 (1979).

- [20] A. Skumanich, A. Frova, N.M. Amer. Sol. St. Commun., **54**, 597 (1985).  
[21] D. Della Sala, P. Fiorini, A. Frova, A. Gregori, A. Skumanich, N.M. Amer. J. Non-Cryst. Sol., **77/78**, 853 (1985).  
[22] N.F. Mott, E.A. Devis. Phil. Mag., **22**, 903 (1970).  
[23] J.P. Gerault, R. Morauchio, G. Constant, Phil. Mag. B, **49**, 11 (1984).  
[24] R. Carius, K. Jahn, W. Sielbert, W. Fuhs. J. Luminesc., **31/32**, 354 (1984).

Редактор Л.В. Шаронова

## **Optical and Electrical Properties of $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ Layers That Can Find Application in Electro-Photography**

*V.H.Kudoyarova, E.I.Terukov, I.N.Trapeznikova, G.N.Violina, N.V.Elkina, and R.A.Kavalauskas*

A.F.Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, 194021, St.-Petersburg, Russia

---