

04;06;12

©1994 г.

УСЛОВИЯ КОНДЕНСАЦИИ И СВОЙСТВА ПЛЕНОК a -Si:H, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ МОЩНОСТИ ВЧ РАЗРЯДА

Х. Сулеман, В.А. Филиков, В.А. Лигачев, Н.Д. Васильева

Московский энергетический институт, 105835

(Поступило в Редакцию 20 января 1992 г.)

В окончательной редакции 25 марта 1992 г.)

Исследована взаимосвязь условий получения, параметров морфологии, плотности состояний на уровне Ферми и макроскопических параметров пленок аморфного гидрированного кремния, полученных методом ВЧ ионно-плазменного распыления при различных значениях мощности разряда. Показано, что наблюдаемые изменения параметров материала вызваны сменой механизма конденсации SiH_2 комплексов на поверхности пленок, выращиваемых при различных значениях технологических параметров.

Несмотря на продолжительные исследования взаимосвязи условий приготовления и электрофизических параметров пленок аморфного гидрированного кремния (a -Si:H), в этой области остается ряд нерешенных проблем. Такое положение вещей, по-видимому, обусловлено многостадийностью процессов конденсации пленок a -Si:H [1]. При этом достаточно сложно выделить определяющие этапы процесса осаждения, исследования которых позволили бы установить закономерности корреляции между условиями конденсации и свойствами пленок a -Si:H. С другой стороны, как бы ни различались вакуумные методы формирования тонких пленок, общими для них являются четыре типа процессов [2]: 1 — формирование движущегося к подложке потока частиц, радикалов, комплексов (как заряженных, так и нейтральных); 2 — аккомодация частиц, радикалов, комплексов (“псевдоатомов”) на поверхности растущей пленки; 3 — захват движущихся по поверхности посредством диффузии “псевдоатомов” растущей пленкой; 4 — обратное испарение “псевдоатомов” в объем вакуумной камеры.

Каждый процесс можно характеризовать вероятностью реализации, определяемой конкретными условиями формирования пленок. Полученные ранее результаты [3,4] дают основания предположить, что процессы 1–4 оказывают влияние как на электрические и оптические

параметры пленок, так и на параметры их столбчатой структуры (морфологии). К сожалению, из-за недостаточного объема экспериментальных данных в настоящее время возможно лишь качественные оценки ожидаемых соотношений между условиями конденсации и параметрами $a\text{-Si:H}$. Это вызывает необходимость дальнейших экспериментальных исследований взаимосвязи условий конденсации, морфологии и свойств $a\text{-Si:H}$, частью которых и является настоящая работа.

Исследовалась серия образцов $a\text{-Si:H}$, осажденных в атмосфере аргон-водород при постоянном соотношении компонентов ($\text{Ar}/\text{H}_2 = 7:1$) и давлении газовой смеси $P = 10^{-2}$ мм рт.ст. на подложку с температурой 250°C . При получении пленок варьируемым технологическим фактором была удельная мощность разряда W . Для измерения проводимости и плотности состояний в щели подвижности $N(E)$ с помощью метода токов, ограниченных пространственным зарядом, и метода постоянного фототока (МПФ) пленки осаждались на поликоронные подложки с предварительно нанесенными никелевыми электродами. Измерения в инфракрасной (ИК) области спектра были выполнены на структурах, в которых подложками служили полированные пластины кремния КДБ-10. Электропроводность образцов определялась отношением тока через образец, усиленного с помощью усилителя постоянного тока У5-9 и измеряемого затем вольтметром, к напряжению на выходе источника питания (обычно 100 В), равному напряжению на образце. Исследовались температурные зависимости темновой и фотопроводимости (при условиях, близких к АМІ) на постоянном токе в диапазоне $20\text{--}260^\circ\text{C}$. Указанные измерения проводились в невакуумированной затемненной камере.

Плотность состояний вблизи уровня Ферми рассчитывалась с помощью метода токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). Для этого при комнатной температуре снимались вольт-амперные характеристики планарных структур с никелевыми электродами. Расчет $N(E)$ по данным ТОПЗ проводился по методике Лен Боера [5]. Максимальная величина напряженности электрического поля в исследованных пленках не превышала $6 \cdot 10^4$ В/см для исключения влияния эффекта Пула-Френкеля.

Как обычно [6], для определения оптической ширины запрещенной зоны материала пленок использовалась экстраполяция зависимости величины $(\alpha \cdot \hbar\omega)^{0.5}$ от $\hbar\omega$. Спектральная зависимость коэффициента поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ рассчитывалась по методике, аналогичной описанной в [6], из экспериментальных спектральных зависимостей коэффициентов пропускания и отражения.

Для измерения характеристик $a\text{-Si:H}$ с помощью МПФ в работе использовалась установка, созданная на основе спектрофотометра СФ-4. В отличие от экспериментального оборудования в [7] данная установка использовалась для исследования характеристик образцов исключительно на постоянном токе. С помощью МПФ рассчитывались величины $\alpha(E)$ при малых значениях энергии фотонов и величины энергии Урбаха E_u .

Микроструктура поверхности (морфология) пленок $a\text{-Si:H}$ исследовалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа УЭМВ-100 К с использованием коллодиевых реплик, оттененных висмутом. Съёмка объектов производилась при ускоряющем напряжении 75 кВ.

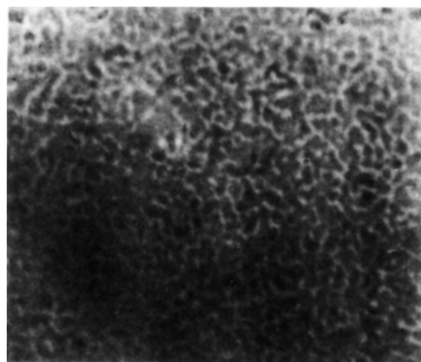
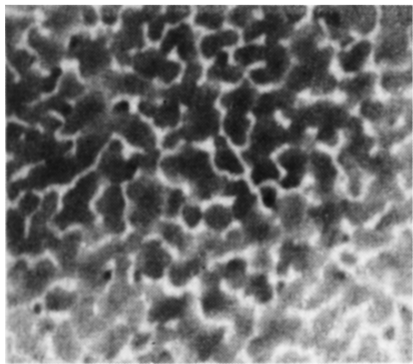


Рис. 1. Изображение оттененной висмутом коллодиевой реплики, отслоенной от поверхности пленки $a\text{-Si:H}$, полученной при $W = 40$ Вт.

Рис. 2. То же, что и на рис. 1, при $W = 60$ Вт.

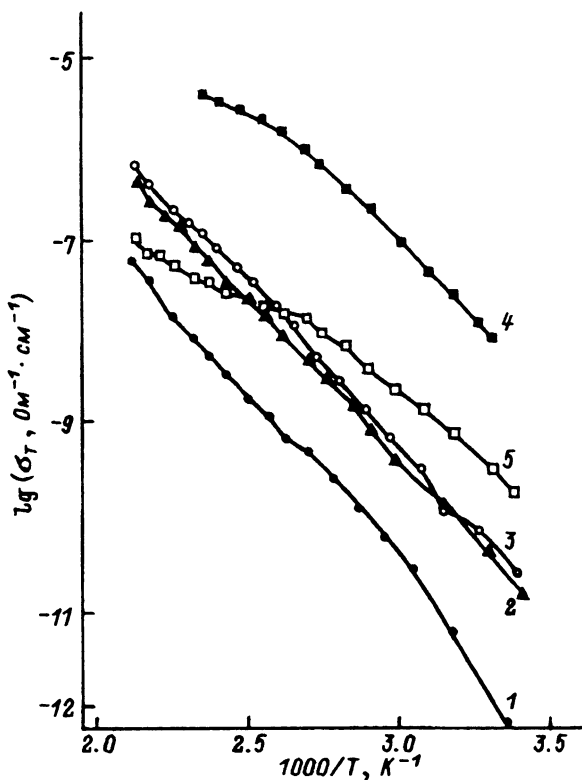


Рис. 3. Температурные зависимости темновой проводимости пленок $a\text{-Si:H}$, полученных при различных значениях мощности ВЧ разряда. 1 — 40, 2 — 60, 3 — 77, 4 — 100, 5 — 125 Вт.

Снимки были получены с увеличением 60 000 крат (рис. 1, 2). Эти данные использовались для расчета усредненной поверхностной концентрации столбов (K) в исследованных пленках.

На рис. 3 приведены экспериментальные температурные зависимости темновой проводимости некоторых из исследованных образцов в координатах Аррениуса. При изменении условий конденсации пленок α -Si:H меняется и характер зависимостей: они могут содержать один или два линейных участка с различной величиной энергии активации. Интерпретация этих результатов требует учета вклада статистического сдвига уровня Ферми E_f в эффективное значение энергии активации темновой проводимости α -Si:H [8]. Предположение, что у образцов, полученных при высоких значениях мощности разряда, E_f находится справа от глобального минимума плотности состояний (сдвинут от минимума $N(E)$ к дну зоны проводимости), позволяет объяснить наблюдаемый экспериментально характер зависимости темновой проводимости в этих образцах. Наличие одного линейного участка в координатах Аррениуса для пленок, полученных при $W \leq 77$ Вт, является косвенным свидетельством совпадения энергетического положения E_f при комнатной температуре с положением глобального минимума плотности состояний в этих пленках.

Экспериментальная проверка перечисленных выше предположений осуществлялась с помощью пошагового варианта [5] методики расчета $N(E)$ в области энергий, близких к E_f , по данным ТОПЗ. На рис. 4 приведены полученные таким образом спектры плотности состояний исследованных в работе образцов α -Si:H. Положение спектров плотности состояний по отношению к дну зоны проводимости определено по энергии активации высокотемпературных участков темновой проводимости [4,5]. Из-за некорректности задачи расчета $N(E)$ [4] графики, приведенные на рис. 4, скорее отражают характер поведения реальных спектров плотности состояний, чем воспроизводят точные значения

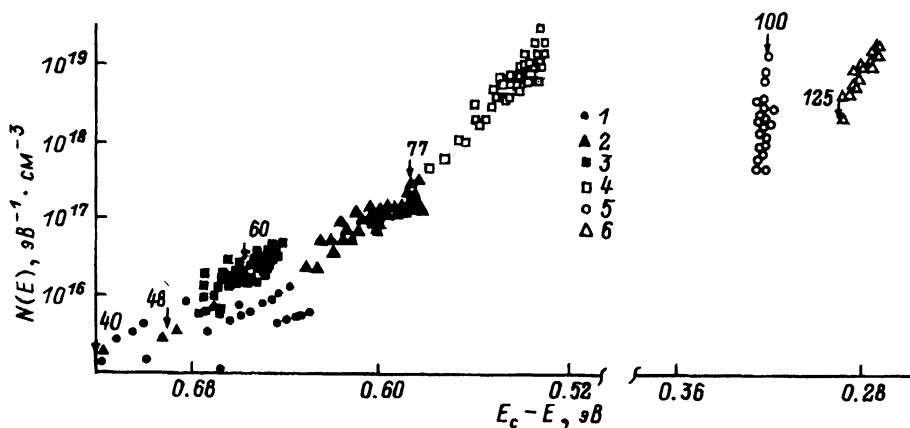


Рис. 4. Полученные по методике [5] спектры плотности состояний в окрестности уровней Ферми исследованных образцов α -Si:H.

Стрелками показано положение уровней Ферми; цифры — значение мощности разряда, при котором получен соответствующий образец. W , Вт: 1 — 40, 2 — 48, 3 — 60, 4 — 77, 5 — 100, 6 — 125.

ния $N(E)$ вблизи уровня Ферми. Тем не менее на качественном уровне можно констатировать подтверждение этими результатами косвенных данных, полученных из анализа температурных зависимостей темновой проводимости. В самом деле, при $W \leq 77$ Вт уровень Ферми находится на участке с относительно небольшим значением производной $dN(E)/dE$, т.е. вблизи глобального минимума плотности состояний. В образцах, полученных при мощности разряда 100 и 125 Вт, уровень Ферми расположен значительно ближе к дну зоны проводимости, значения производной $dN(E)/dE$ на уровне Ферми существенно выше, чем в остальных образцах.

Попытаемся дать ответ на вопрос, что является первопричиной заметного изменения положения уровня Ферми в $a\text{-Si:H}$ при изменении мощности разряда. С этой целью проанализируем поведение различных параметров полученных пленок под влиянием увеличения W (рис. 5,а-г). На рис. 5,а приведены графики зависимости от W темновой (кривая 1) и фотопроводимости (кривая 2) образцов при комнатной температуре. На рис. 5,б показаны зависимости от мощности разряда оптической ширины запрещенной зоны и характеристической энергии наклона урбаховского края поглощения. Как и рассмотренные выше данные на рис. 3 и 4, зависимости параметров $a\text{-Si:H}$ на рис. 5,а,б имеют особенности поведения в области "критического" значения мощности ВЧ разряда $W^c = 85\text{--}95$ Вт. Это указывает на существенные изменения режимов осаждения, атомной структуры, морфологии и макроскопических свойств материала, происходящих в узком диапазоне значений W в окрестности W^c . В соответствии с [3,4] причиной наблюдаемых изменений может быть изменение механизмов конденсации различных SiH_n комплексов ($n = 0, 1, 2, 3$) на поверхности пленок $a\text{-Si:H}$ в процессе их роста. Такое предположение подтверждается результатами исследования концентрации SiH_n комплексов в полученных пленках $a\text{-Si:H}$ методом ИК спектроскопии (рис. 5,в). В области W , близких к "критическому" значению, происходит изменение механизма конденсации SiH_2 комплексов на поверхности растущей пленки от неполной конденсации ($\tau_c > \tau_a$) при низких значениях W к полной конденсации ($\tau_c < \tau_a$) по мере увеличения W (где τ_c — среднее время жизни SiH_n комплекса до его захвата растущей пленкой, τ_a — среднее время жизни до его реиспарения). Благодаря этому в области W^c происходит резкое обогащение пленок $a\text{-Si:H}$ водородом, что и приводит в конечном итоге к изменению ряда макроскопических параметров этого материала. Следуя [3,4], можно ожидать также, что изменение режимов конденсации SiH_n комплексов приведет к изменению структуры ближнего порядка в материале, варьированию условий зародышеобразования пленок [2] и, как следствие, изменению их морфологии. Полученные нами результаты электронно-микроскопических исследований поверхности пленок (рис. 1, 2, 5,г) находятся в согласии с последним предположением. Переход от режима неполной к режиму полной конденсации SiH_2 комплексов приводит к заметному уменьшению средней концентрации "столбов" на поверхности пленок. Отметим, что характер зависимости логарифма средней концентрации столбов от W схож с характером зависимостей $\lg(K)$ от парциального давления водорода, приведенных в работе [4], несмотря на то, что морфология различных серий пленок $a\text{-Si:H}$ исследовалась различными методами: в настоящей

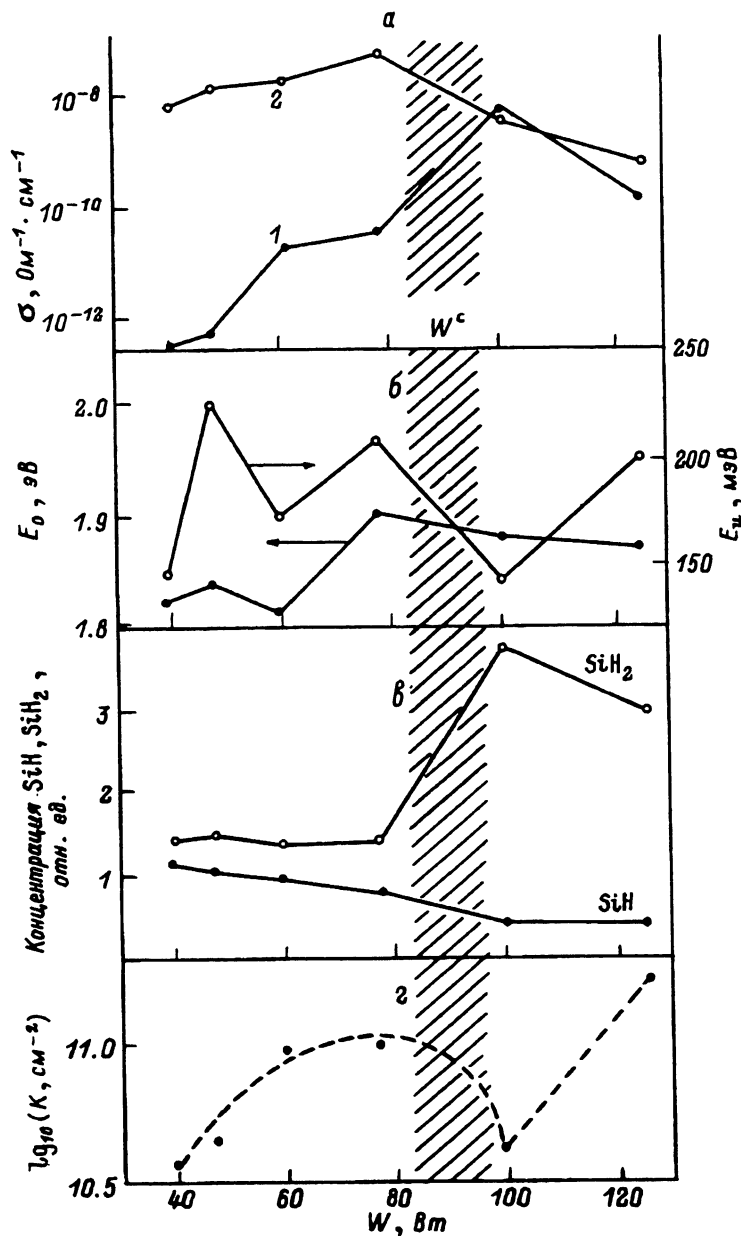


Рис. 5. Зависимость концентрации SiH_n комплексов, параметров морфологии и электрофизических параметров пленок $\alpha\text{-Si:H}$ от мощности разряда W , при которой они получены.

работе использованы коллоидные реплики, а в работе [4] — сканирующая электронная микроскопия. Таким образом, можно заключить, что основной причиной смещения уровня Ферми и изменения параметров исследованных пленок $a\text{-Si:H}$ является изменение механизма конденсации SiH_2 комплексов в процессе выращивания пленок.

Сопоставляя данные на рис. 5, 6 и 8, приходим к выводу, что пленки с большим содержанием SiH_2 комплексов имеют довольно большую оптическую ширину запрещенной зоны (1.85–1.87 эВ), однако увеличение E_0 непосредственно не связано с изменением механизма конденсации указанных комплексов. Величина энергии Урбаха достигает локального минимума в пленках, полученных в режиме полной конденсации. Иными словами, макроскопические параметры пленок $a\text{-Si:H}$ могут претерпевать существенные изменения не только при достижении “критических” значений параметров, но и в “окрестности” таких значений.

Список литературы

- [1] Томпсон М. // Физика гидрогенизированного аморфного кремния / Под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски. Ч. I. М.: Мир, 1988. 390 с.
- [2] Robins J.L. // Appl. Surf. Sci. 1988. Vol. 33/34. P. 379–394.
- [3] Ligachov V.A. // Die Werke zum 35. Int. Wissenschaftl. Koll. Ilmenau, 1990. Ht. 4. S. 56–59.
- [4] Лигачев В.А., Гордеев В.Н., Филиков В.А., Сулеман Х. // ФТП. 1991. Т. 25. Вып. 9. С. 1536–1541.
- [5] Den Boer W. // J.de Phys. Coll. 1981. Vol. 42. N 4. Suppl. 10. P. C4.451–C4.454.
- [6] Лей Л. // Физика гидрогенизированного аморфного кремния / Под ред. Дж. Джоунопулоса и Дж. Люковски. Ч. II. М.: Мир, 1988. 488 с.
- [7] Vanesek M., Abraham A., Stiko O. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 1984. Vol. 83. P. 617–623.
- [8] Голикова О.А., Домашевская Э.П., Казанин М.М. и др. // ФТП. 1989. Т. 23. Вып. 3. С. 450–455.