

ния хвостов соответствующих зон. Их вклад в фототок определяется дрейфовой подвижностью  $\mu$  и энергией активации носителей в делокализованные состояния. При повышении температуры  $\mu$  увеличивается и спектр квантовой эффективности характеризуется определенной пороговой энергией и малой энергией образования электронно-дырочной пары, т.е. все большее число носителей, рожденных процессом ударной ионизации, дают вклад в фототок.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в процессе ударной ионизации при  $\eta > 1$  в аморфных полупроводниках определяющую роль имеет дрейфовая подвижность носителей заряда, которая контролируется спектром локализованных состояний соответствующих разрешенных зон и зависит от типа структуры аморфной сетки.

Авторы выражают благодарность А.С. Волкову за полезное обсуждение результатов и В.Е. Челнокову за поддержку и интерес к данной работе.

### Список литературы

- [1] Атаев Ж., Васильев В.А., Волков А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 3. С. 81–84. ФТП. 1991. Т. 25. Вып. 8. С. 1350–1354.
- [2] Васильев В.А., Кумеков М.Е., Теруков Е.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 9. С. 24–27.
- [3] Брицин К.И., Вавилов В.С. // Опт. и спектр. 1960. Т. 8. Вып. 6. С. 861–864.

02;03;04;05;06;10;11;12

Журнал технической физики, т. 65, в. 1, 1995

© 1995 г.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ И СВОЙСТВА СЛОЕВ КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ СТРУЙНЫМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АКТИВАЦИЕЙ ГАЗОВ

Р.Г.Шарафутдинов,<sup>1</sup> М.Р.Бакланов,<sup>2</sup> Б.М.Аюпов,<sup>3</sup> А.М.Бадалян,<sup>4</sup>  
О.В.Поляков,<sup>3</sup> А.В.Скрытников,<sup>1</sup> А.В.Паразневич,<sup>1</sup>  
К.Мозильников,<sup>2</sup> С.А.Бирюков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт неорганической химии СО РАН, Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 15 июня 1994 г.)

1. Интерес к пленкам гидрогенизированного аморфного кремния  $\alpha$ -Si:H определяется целым рядом практических приложений, главными из которых в настоящее время является создание  $p-i-n$ -структур для солнечных элементов и функциональных слоев активных транзисторных матриц для жидкокристаллических дисплеев. Чаще всего пленки  $\alpha$ -Si:H синтезируют в плазмохимических ВЧ-реакторах. Процессы в таких реакторах принципиально плохо

управляемы, так как изменение любого внешнего параметра требует изменение практически всех остальных, вызывая тем самым изменение состава и электрофизических характеристик пленок. Поэтому диапазон условий, при которых можно получить качественные пленки, всегда оказывается узким. Так, скорость осаждения  $a\text{-Si:H}$  в плазмохимических реакторах можно увеличить лишь до  $100 \text{ \AA}/\text{мин}$ , тогда как специфика указанных приложений требует существенно большей производительности процессов осаждения.

Альтернативным методом осаждения слоев  $a\text{-Si:H}$ , активно развиваемым в последние годы, является струйный плазмохимический метод [1,2]. В этом методе исключаются контакты реагентов со стенками реактора и соответствующие каналы вторичных реакций, связанных с гетерогенными процессами на стенках. Кроме этого, давление в газовом источнике поддерживается таким, чтобы исключить или свести к минимуму столкновение молекул в струе. Эти обстоятельства приводят к тому, что на растущей поверхности пленки вступают в реакцию только продукты первичного взаимодействия электронов с молекулами  $\text{SiH}_4$ . Изменением тока и энергии электронного пучка можно варьировать скорость осаждения в широком диапазоне без изменения маршрутов протекания реакции.

В настоящей работе показано, что в реакторах такого типа можно получать слои  $a\text{-Si:H}$  со скоростью, существенно превышающей скорости осаждения в обычного типа плазмохимических реакторах. Качество слоев при этом не уступает лучшим достижениям на основе традиционного плазмохимического процесса.

2. Идея метода следующая. Рабочий газ (5% моносилана в аргоне) из источника поступает в вакуумную камеру через специальное отверстие (сопло). При расширении газа в вакуумную камеру формируется свободная сверхзвуковая струя низкой плотности, в которой по мере удаления от источника быстро уменьшается плотность и температура. Активация газа осуществляется электронным пучком с энергией несколько кэВ, который пропускается в непосредственной близости от сопла в зоне повышенной плотности. Первичные и вторичные электроны ионизируют и диссоциируют молекулы газа, а также возбуждают внутренние степени свободы молекул и радикалов. Концентрация активированных частиц (по крайней мере тех, которые определяют рост слоя  $a\text{-Si:H}$ ) меняется прямо пропорционально току электронного пучка.

В зависимости от поставленных аналитических задач пленки  $a\text{-Si:H}$  выращивались на подложках монокристаллического Si и Ge, на пластинках Si со слоем термического оксида ( $d = 10000 \text{ \AA}$ ) и на стеклянных пластинах. Все подложки предварительно промывались в органических растворителях, а подложки Si и Ge дополнительно обрабатывались в травителях на основе перекиси водорода с водным раствором аммиака или щелочи. Время роста задавалось включением и выключением иодачи газа в источник.

Для анализа пленок использовались методы эллипсометрии, ИК спектроскопии и электрофизические измерения для определения температурной и световой проводимости. Подробнее описание методик измерений, включая особенности обработки результатов, будет дано в готовящейся к публикации более детальной работе.

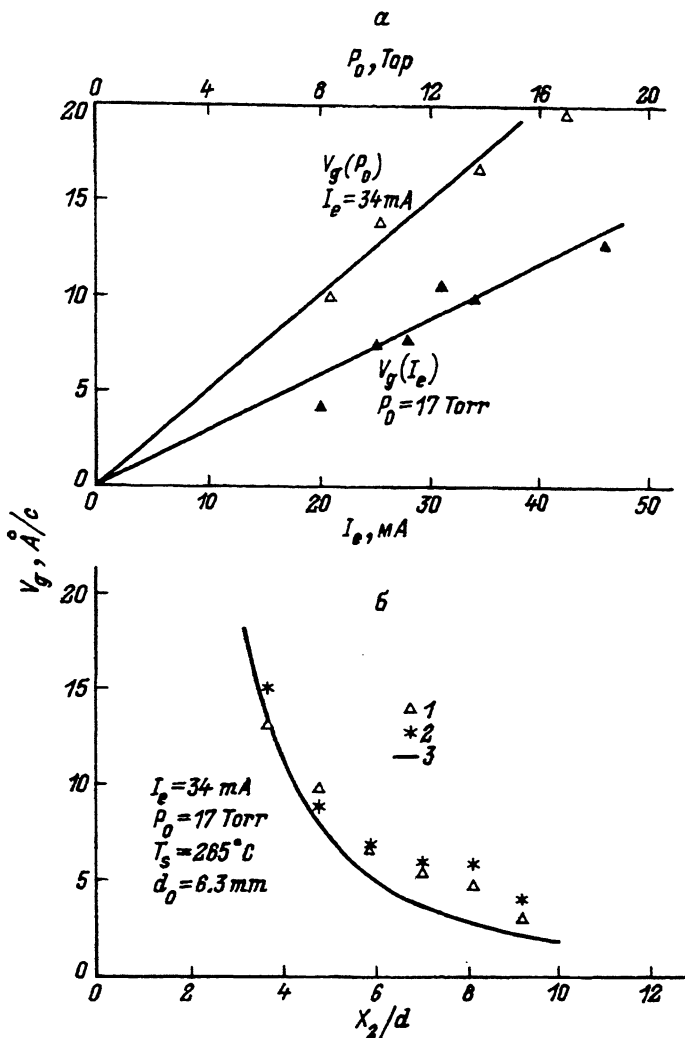


Рис. 1. Зависимость скорости роста от давления в форкамере  $P_0$ , тока пучка  $I_e$  (а), расстояния сопло-подложка  $X_2$ .  
 1 — измерения с помощью интерферометра, 2 — измерения с помощью эллипсометра, 3 — теория,  $V_g^{\max} = 3.3 \cdot 10^{-4}$ .

3. Из рис. 1 видно, что скорость роста пленок меняется прямо пропорционально давлению газа в источнике и току электронного пучка. При увеличении расстояния от сопла источника до образца скорость роста падает. Все эти зависимости хорошо укладываются в рамки довольно простых представлений о характере происходящих явлений и поэтому легко моделируются.

Действительно, повышение давления в форкамере приводит к росту плотности частиц в струе, в результате при одной и той же плотности тока электронного пучка растет концентрация рождающихся активных частиц. Такой же эффект достигается при увеличении тока электронного пучка при постоянном давлении исходного газа в источнике. Что

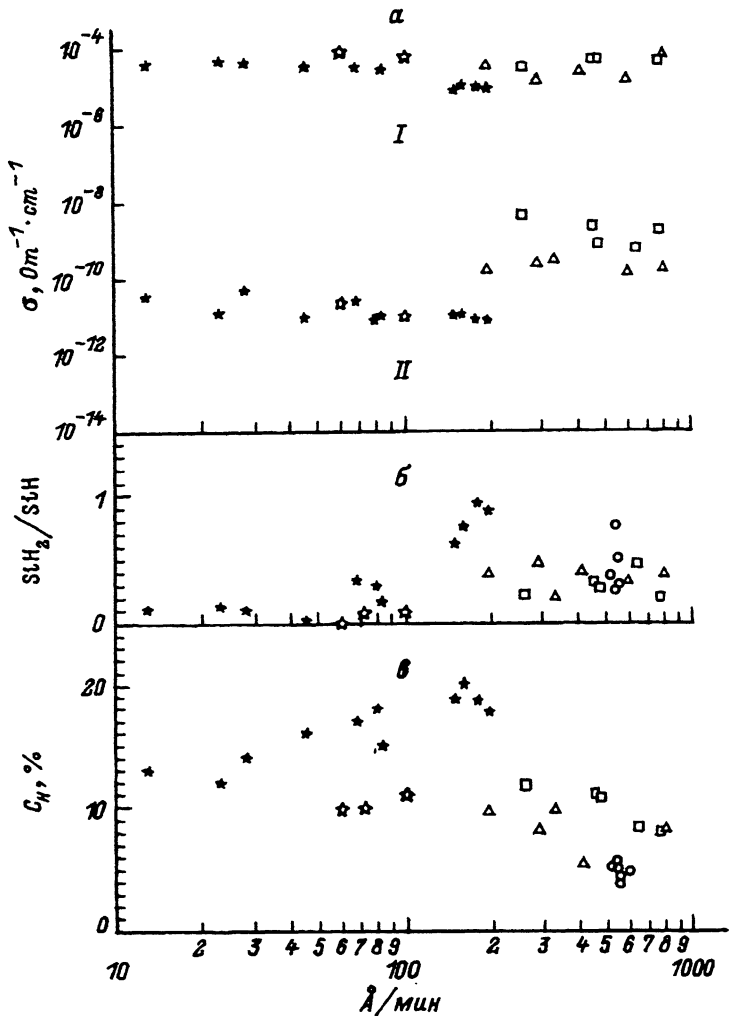


Рис. 2. Фото- $G_{ph}$ , темновая проводимость  $G_d$  (а: I — фотопроводимость, II — проводимость), соотношение связей  $SiH_2/SiH$  (б) и содержание водорода  $C_H$  (в) в зависимости от скорости роста пленок  $\alpha$ -Si:H, выращенных при  $T_s = 265^\circ C$  и различном давлении в форкамере (о), различном токе пучка (□), различном расстоянии сопло-подложка ( $\Delta$ ), а также результаты, полученные фирмой Sanyo [4] при  $T_s = 270$  (\*).  $160^\circ C$  (★).

же касается зависимости скорости роста от расстояния от сопла, то она отражает уменьшение плотности газа по мере удаления от источника [3] (рис. 1, б — сплошная кривая).

Эти результаты свидетельствуют о высокой степени "предсказуемости" и управляемости процессов роста. Из рис. 1, б видно, что увеличением плотности тока электронного пучка действительно можно перейти в область высоких скоростей роста без заметного изменения механизма реакции (линейная зависимость). Следует заметить, что в этих экспериментах нам удалось реализовать скорости роста,

на порядок более высокие, чем в традиционных ВЧ плазмохимических реакторах.

Рассмотрим теперь результаты анализа состава слоев, их электрофизические характеристики и сравним с аналогичными параметрами пленок, полученных в плазмохимическом реакторе. На рис. 2 представлены зависимости концентрации водорода, соотношения соотношения  $\text{SiH}_2/\text{SiH}$  в полученных слоях, зависимость их проводимости от скорости роста слоев  $\alpha\text{-Si:H}$ . На этом же рисунке приведены результаты аналогичных измерений, выполненных на слоях, выращенных в ВЧ плазмохимическом реакторе [4]. Как видно из этого рисунка, при ВЧ плазмохимическом нанесении уже при скорости роста выше  $100 \text{ \AA}/\text{мин}$  происходит заметное увеличение концентрации водорода, тогда как оптимальным с точки зрения электрофизики и временной стабильности является содержание водорода на уровне 10–12 %. Увеличение концентрации водорода, как видно из этого рисунка, обусловлено ростом относительной концентрации  $\text{SiH}_2$  групп.

Что же касается слоев  $\alpha\text{-Si:H}$ , полученных струйным плазмохимическим способом, то они при существенно более высоких скоростях роста сохраняют значение концентрации водорода и отношение  $\text{SiH}_2/\text{SiH}$  групп, близкие к оптимальному. Отношение световой и темновой проводимости вполне удовлетворительно с точки зрения технологии изготовления солнечных элементов.

Таким образом, в настоящей работе показано, что струйный плазмохимический метод дает возможность существенно повысить скорость роста без ущерба для качества пленок. Более того, характер зависимостей позволяет надеяться, что имеется возможность еще большего увеличения скорости роста.

#### Список литературы

- [1] Halpern B.L., Schmitt J.J., Golz J.W. et al. // Appl. Surf. Sci. 1991. Vol. 48/49. P. 19–26.
- [2] Sharafutdinov R.G., Sukhinin G.I., Veshchikov S.I. Biryukov S.A. // 10<sup>th</sup> Intern. Symp. Plasma Chem. Bochum (Germany), 1991. Vol. 3. P. 1–6.
- [3] Askenas H., Sherman F.S. // Proc. 4<sup>th</sup> Intern. Symp. Vol. 2. New York; London: Academic Press, 1966. P. 84–94.
- [4] Hishikawa J., Tsuda S., Wakisaka K., Kuwano Y. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73. N 9. P. 4247–4251.