

05.2; 06.3

© 1991

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ
В ПЛЕНКАХ $a\text{-Si:H}$
В УФ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Ж. А т а е в, В.А. В а с и л ь е в,
А.С. В о л к о в, М. К у м е к о в,
Е.И. Т е р у к о в, И.В. Щ в е д к о в

1. Как известно [1-3], пленки аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$) обладают выдающимися фотоэлектрическими свойствами: кратность фотопроводимости (ФП) (i_{φ} / i_T) в них достигает $10^4\text{-}10^5$ при освещении от источника видимого света с интенсивностью $N = 10^{17}\text{-}10^{18}$ фотон/см²·с. Однако до сих пор характеристики пленок исследовались только в ближнем ИК и видимом спектральном диапазоне.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования стационарной ФП пленок $a\text{-Si:H}$ в более широком спектральном диапазоне ($h\nu = 1.5\text{-}6.3$ эВ). Обнаружено, что при энергии квантов возбуждающего света $h\nu > 3.6$ эВ имеет место заметный рост квантовой эффективности внутреннего фотоэффекта (в два раза при $h\nu = 6$ эВ), что может быть естественно отнесено на счет ударной ионизации.

2. Пленки $a\text{-Si:H}$ толщиной от 700 до 3000 Å были получены методом разложения газовой смеси SiH-Ar (60:40) в ВЧ тлеющем разряде при температуре подложки $T_s = 250$ °С. Образцы для исследования ФП представляли собой структуры Al-a-Si:H-Al с планарным расположением электродов, расстояние между которыми составляло $l = 3$ и 10 мкм. Геометрия образцов представлена на рис. 1, а. Для измерения спектральной зависимости фототока (i_{φ}) пленки облучались светом от галогенной лампы накапливания в диапазоне энергий $h\nu = 1.5\text{-}3.5$ эВ и от $\text{H}_2 + \text{D}_2$ - лампы в диапазоне энергий $h\nu = 3\text{-}6.3$ эВ со средним потоком фотонов $N = 10^{11}\text{-}10^{12}$ фотон/см²·с.

Для точного учета числа поглощенных фотонов измерялись также спектр отражения ($R(h\nu)$) и край оптического поглощения $\alpha(h\nu)$.

3. На рис. 1 представлена типичная спектральная зависимость стационарного фототока для структур Al-a-Si:H-Al с $l = 10$ мкм при $T = 295$ К. Как видно из рисунка, спектр фототока имеет сложную форму: при возрастании $h\nu$ сначала наблюдается резкий рост фототока, обусловленный ростом коэффициента поглощения в области энергий фотонов 1.7-2.1 эВ, затем

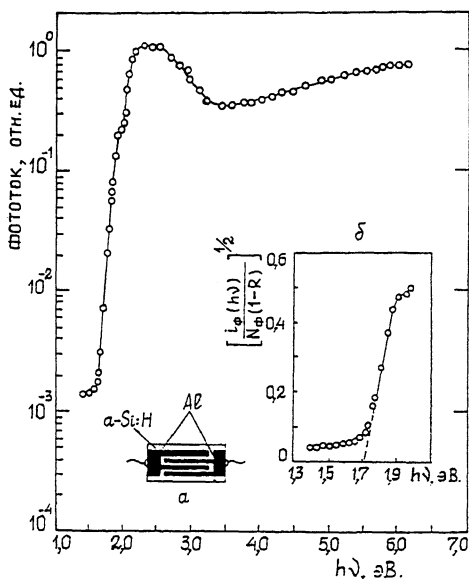


Рис. 1. Спектральная зависимость фототока структур $Al-a-Si:H-Al$ при $T = 295$ К и $l = 10$ мкм.

На вставке экстраполяция кривой $[i_{\phi} \cdot h\nu / eN(1-R)]^{1/2} = 0$, дающая величину $E_g = 1.7$ эВ.

происходит некоторое падение фототока в области энергий $h\nu = 2.2-3.6$ эВ, а начиная с $h\nu > 3.6$ эВ фототок снова увеличивается вплоть до предельно достигнутой в эксперименте энергией $h\nu = 6.3$ эВ. Аппроксимация зависимости $[i_{\phi} \cdot h\nu / eN(1-R)]^{1/2}$ от $h\nu$ в области красной границы позволяет определить ширину запрещенной зоны (на вставке рис. 1, б); она составляет $E_g = 1.7$ эВ и хорошо согласуется с величиной, определенной по краю оптического поглощения, согласно стандартной процедуре [3] $(\alpha \cdot h\nu)^{1/2} = (h\nu - E_g)$.

Квантовая эффективность внутреннего фототока, как известно, определяется выражением

$$\eta(h\nu) \sim [i_{\phi}(h\nu) / eN(1-R)] \cdot [1 - \exp(-\alpha(h\nu)l)].$$

На рис. 2, а приведен результат расчета $\eta(h\nu)$ с учетом измеренных зависимостей $\alpha(h\nu)$ и $R(h\nu)$ в широком спектральном интервале (рис. 2, б). Как видно из рисунка, в области энергий $h\nu = 1.7-3.0$ эВ квантовая эффективность постоянна ($\eta = 1$ эл/фотон), затем наблюдается некоторое уменьшение η , обусловленное влиянием поверхностной рекомбинации; начиная с энергий фотонов $h\nu = 3.6$ эВ, η увеличивается, удваиваясь при $h\nu =$

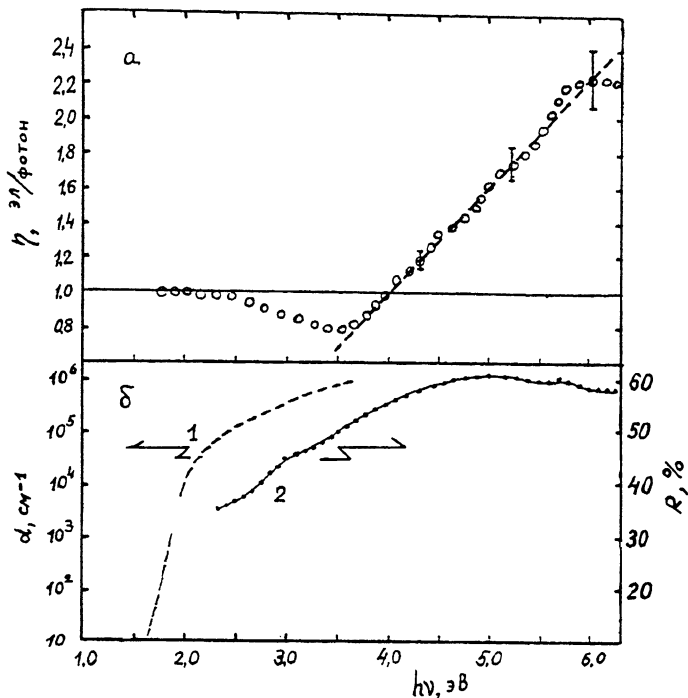


Рис. 2. Спектральная зависимость квантовой эффективности внутреннего фотоэффекта в $a\text{-Si:H}$ (а) и 1 - $\alpha(h\nu)$ и 2 - $R(h\nu)$ (б) при $T = 295$ К.

$= 6$ эВ. Скорость поверхностной рекомбинации можно изменять, варьируя технологические параметры осаждения пленок. Обработка пленок водородом приводит к ослаблению поверхностной рекомбинации.

Ход полученной спектральной зависимости $q(h\nu)$ в УФ диапазоне при $h\nu > 3.6$ эВ позволяет утверждать, что в $a\text{-Si:H}$ имеет место процесс ударной ионизации носителей заряда и этот процесс имеет явно выраженный пороговый характер. Как видно из рис. 2, пороговая энергия увеличения квантовой эффективности составляет $q_i = 3.6$ эВ.¹ Наличие порога возрастания $q(h\nu)$ означает, что при энергии возбуждающего света, равной или большей пороговой, фотоэлектрон (или фотодырка) приобретает кинетическую энергию, достаточную для ионизации еще одной электрон-дырочной пары.

¹ Напряженность электрического поля вплоть до 10^4 В/см не влияет на спектр $q(h\nu)$ и величину \mathcal{E}_i , а $i_p(E)$ изменяется линейно.

Величина найденного порога \mathcal{E}_i в $a\text{-Si:H}$ удивительно хорошо совпадает с аналогичной величиной для кристаллического кремния [4]. Поскольку в аморфных полупроводниках правила отбора с учетом сохранения квазиимпульса для дна зоны не работают, то проговая энергия ударной ионизации \mathcal{E}_i (например, для зоны проводимости) должна определяться лишь с учетом сохранения энергии и быть меньше, чем в кристаллическом аналоге.

Тот факт, что пороги возрастания $\eta(h\nu)$ в $a\text{-Si:H}$ и в кристаллическом кремнии совпадают, говорит о том, что эти пороги определяются не \mathcal{E}_i , а порогами новых оптических переходов в поглощении, при которых фотоносители в обоих случаях уже сразу имеют энергию, превосходящую пороги ударной ионизации, поэтому разница в значениях \mathcal{E}_i не сказывается на значениях η_i . Правда, для такого вывода надо допустить, что зонные структуры $a\text{-Si:H}$ и кристаллического кремния в области больших энергий совпадают.

Другой важной характеристикой процесса ударной ионизации является величина средней энергии образования электронно-дырочной пары Δ_i , определяемой по наклону зависимости $\eta(h\nu)$. Эта величина отражает конкуренцию между процессами ударной ионизации и другими процессами релаксации энергии горячих носителей (испускание фононов, межэлектронное рассеяние и т.д.). Определенная вблизи первого порога (по наклону пунктирной прямой на рис. 2, а) величина Δ_i для $a\text{-Si:H}$ оказалась равной $\Delta_i = 2.4$ эВ/пару, что заметно меньше аналогичной величины в кристаллическом кремнии $\Delta_i = 3.62$ эВ/пару [4]. Эта разница может быть отнесена за счет более благоприятных условий для ударной ионизации в $a\text{-Si:H}$, о чем уже говорилось выше.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] C a r l s o n D.E. // Solar Energy Materials. 1980. V. 3. P. 503-518.
- [2] Х а м а к а в а Е. В кн.: Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики. М.: Мир, 1988. С. 139-200.
- [3] Amorphous Silicon and Related Materials. Vol A+B, Ed by H. Fritzsche. World Scientific, Singapore, 1988.
- [4] C h r i s t e n s e n O. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 2. P. 689-695.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
15 ноября 1990 г.