

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $a\text{-Si} : \text{H}$ И СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ В УФ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Атаев Ж., Васильев В. А., Волков А. С.,  
Кумеков М. Е., Теруков Е. И., Шведков И. В.]

Проведены исследования фоточувствительности фотодатчиков (диодов Шоттки)  $n-i\text{-Pd}$  на основе  $a\text{-Si} : \text{H}$  и его сплавов, а также фотопроводимости структур  $\text{Al}-a\text{-Si} : \text{H}-\text{Al}$  в широком спектре энергий фотонов ( $1.5 \leq h\nu \leq 6.3$  эВ) при  $T=300$  К. Показана возможность сдвига красной границы спектра фоточувствительности в зависимости от толщины и состава  $i$ -слоя. Исследования квантовой эффективности внутреннего фотоэффекта с учетом измеренных коэффициентов поглощения и отражения позволяют утверждать, что в  $a\text{-Si} : \text{H}$  в УФ диапазоне спектра имеет место процесс ударной ионизации носителей заряда и он носит явно выраженный пороговый характер при энергиях  $\epsilon_i=3.6$  эВ.

Полупроводниковые фотоприемники, чувствительные в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра, в основном созданы на основе барьеров Шоттки на кристаллических полупроводниках [1-6]. Однако такие фотоприемники обладают рядом недостатков, а именно сложной и дорогой технологией изготовления, низкой квантовой эффективностью в УФ диапазоне спектра из-за поверхностной рекомбинации, а также определенной красной границей фоточувствительности, определяемой шириной запрещенной зоны ( $E_g$ ).

Недавно было показано [7-9], что  $p-i-n$ -структуры и структуры с барьером Шоттки [ $n-i\text{-M}$  (Pd, Pt)] на основе тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния ( $a\text{-Si} : \text{H}$ ) являются эффективными фотоприемниками УФ излучения и обладают рядом преимуществ по сравнению с датчиками на кристаллах, а именно простой и дешевой технологией изготовления, неограниченными приемными площадями и высокой квантовой эффективностью в УФ диапазоне ( $\eta \geq 0.6$  эл/фот).

Далее приводятся результаты исследований фоточувствительности датчиков (диодов Шоттки)  $n-i\text{-Pd}$  на основе  $a\text{-Si} : \text{H}$  в зависимости от толщины  $i$ -слоя и его состава с целью выяснения возможностей сдвига красной границы фоточувствительности в синюю область спектра. Для получения информации о высокой квантовой эффективности в УФ диапазоне спектра нами была исследована фотопроводимость (ФП) структур  $\text{Al}-a\text{-Si} : \text{H}-\text{Al}$  и показано, что увеличение фототока в УФ области обусловлено ударной ионизацией носителей заряда.

Структуры с барьером Шоттки ( $n-i\text{-Pd}$ ) формировались на металле (Ni, Cr, Mo), напыленном на сапфировую или керамическую подложку. В качестве  $n^+$ -слоя толщиной  $d=200-300$  Å использовался  $a\text{-Si} : \text{H}$ , легированный фосфором, а  $i$ -слой наносился либо из  $a\text{-Si} : \text{H}$  с  $d=700-3000$  Å, либо из  $a\text{-Si}_{0.8}\text{C}_{0.2} : \text{H}$  с  $d=1500$  Å путем разложения газовых смесей  $\text{SiH}_4-\text{Ar}$  или  $\text{SiH}_4-\text{CH}_4-\text{Ar}$  в ВЧ тлеющем разряде [8]. Полупрозрачный барьерный электрод из палладия  $d=150-200$  Å наносился на  $i$ -слой термическим испарением. Конструкция диода Шоттки представлена на вставке к рис. 1. Фотосопrotивление  $\text{Al}-a\text{-Si} : \text{H}-\text{Al}$  было изготовлено путем напыления на пленку нелегированного  $a\text{-Si} : \text{H}$  планарных электродов из алюминия с расстоянием между ними 10 и 200 мкм. Конструкция представлена на рис. 2, а. Фоточувствитель-

ность и ФП структур была исследована при комнатной температуре в широком спектре энергий фотонов от 1.5 до 6.3 эВ со средним падающим потоком фотонов  $N=10^{11}-10^{12}$  фот/см<sup>2</sup>.с. В качестве источников света использовались галогенная лампа накаливания ( $h\nu=1.5-3.5$  эВ) и дейтериевая лампа ( $h\nu=3-6.3$  эВ), которая была проградуирована люминофором. Для точного учета числа поглощенных фотонов в случае ФП измерялись также спектр отражения [ $R(h\nu)$ ] и край оптического поглощения [ $\alpha(h\nu)$ ].

Типичные спектральные зависимости фототока короткого замыкания ( $i_\phi$ ) для  $n-i$ -Pd-структур с различной толщиной  $i$ -слоя  $a$ -Si : H приведены на

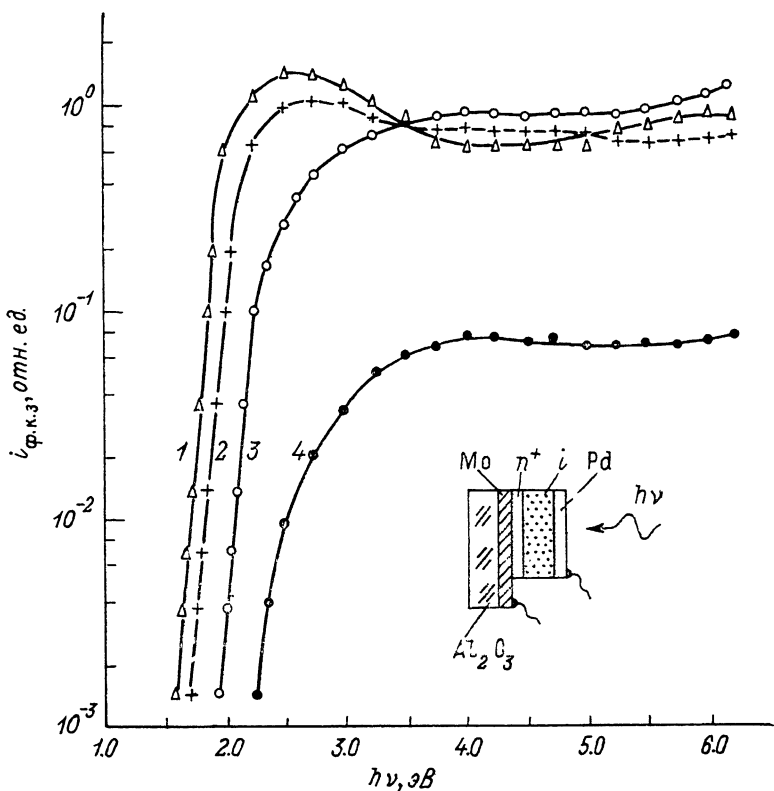


Рис. 1. Спектры фототока короткого замыкания  $n-i$ -Pd-структур при  $T=300$  К.

Фототок приведен к равному числу падающих фотонов. Толщина  $i$ -слоя  $a$ , Å: 1 — 3000, 2 — 1600, 3 — 700  
4 — структура  $n^+-i-a\text{-Si}_{0.8}\text{C}_{0.2}$  : H—Pd с  $d=1500$  Å.

рис. 1 (кривые 1—3). На том же рисунке (кривая 4) приведена спектральная зависимость  $i_\phi$  для структуры, когда  $i$ -слой был выполнен из  $a\text{-Si}_{0.8}\text{C}_{0.2}$  : H. Видно, что по мере уменьшения толщины  $i$ -слоя и его состава красная граница спектра фоточувствительности сдвигается в синюю область и наблюдается уменьшение фототока в области видимого света. В УФ диапазоне спектра ( $h\nu > 3.6$  эВ)  $i_\phi$  в зависимости от толщины  $i$ -слоя  $a\text{-Si}$  : H носит более сложный характер. Так, спектральная зависимость  $i_\phi$  в УФ области спектра свидетельствует о практически полном разделении электронно-ионных пар внутренним полем барьера. Это может быть обусловлено следующим:

- 1) очень малой длиной свободного пробега (15—20 Å) горячих носителей в  $i$ -слое, что ведет к отсутствию потерь на вылет их надбарьерно в металл;
- 2) пренебрежимо малой ролью поверхностной рекомбинации на границе  $M-a\text{-Si}$  : H;
- 3) ударной ионизацией носителей заряда в УФ области ( $h\nu > 3.6$  эВ).

С целью выяснения роли ударной ионизации носителей заряда нами были проведены исследования ФП на структурах  $\text{Al}-a\text{-Si}$  : H—Al в широком спек-

тральном диапазоне. Спектральная зависимость стационарного фототока представлена на рис. 2. Спектр фототока имеет сложную форму; при увеличении энергии фотонов наблюдается резкий рост фототока, обусловленный ростом коэффициента поглощения  $[\alpha(h\nu)]$  в области энергий фотонов 1.7–2.1 эВ, затем происходит некоторое уменьшение фототока в области энергий 2.2–3.6 эВ, а, начиная с  $h\nu > 3.6$  эВ, фототок снова увеличивается вплоть до предельно достигнутой в эксперименте энергии  $h\nu = 6.3$  эВ. Аппроксимация зависимости  $[i_\phi h\nu/eN(1-R)]^{1/2}$  от  $h\nu$  в области красной границы позволяет определить

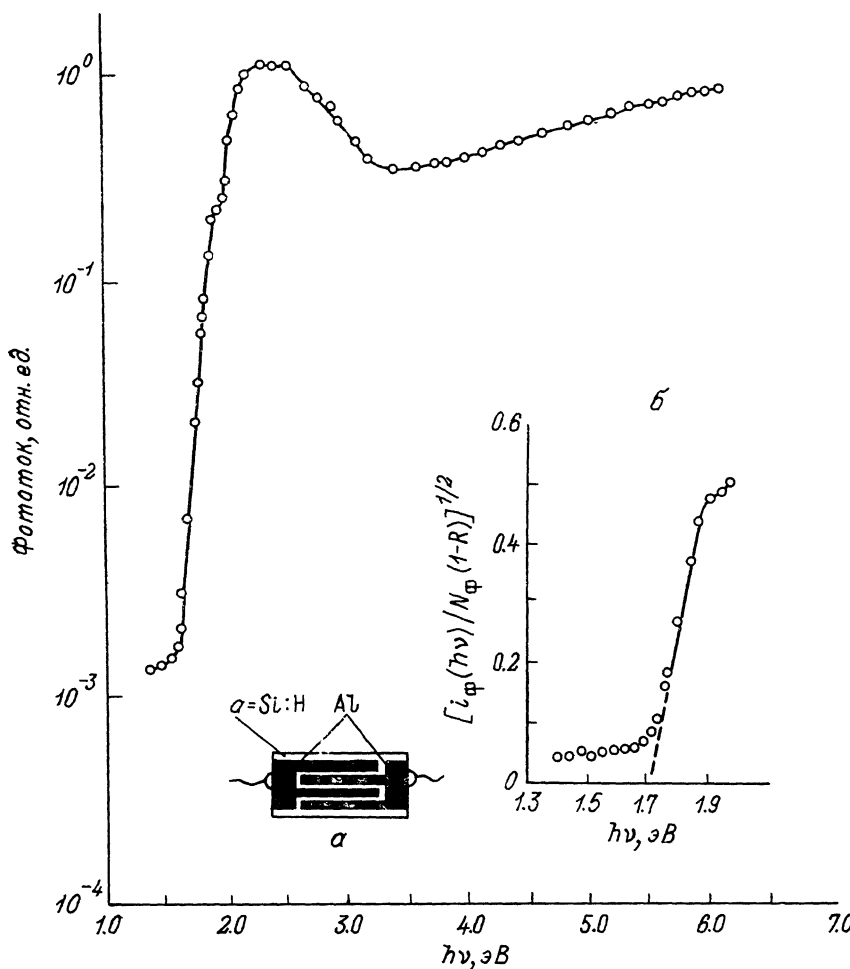


Рис. 2. Спектральная зависимость фототока структур Al—*a*-Si:H—Al при  $T=300$  К и  $d=10$  мкм.

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

ширину запрещенной зоны (на вставке к рис. 2)  $E_g=1.7$  эВ, что хорошо согласуется с величиной, определенной по краю оптического поглощения согласно стандартной процедуре  $(\alpha h\nu)^{1/2}=(h\nu-E_g)^{1/2}$  [10].

Квантовая эффективность внутреннего фотоэффекта, как известно, определяется выражением

$$\mu\tau(h\nu) \approx [i_\phi(h\nu)/eN(1-R(h\nu))] [1 - \exp(-\alpha(h\nu)d)],$$

где  $\mu$  — подвижность носителей,  $\tau$  — их время жизни,  $N$  — поток фотонов,  $\alpha(h\nu)$  и  $R(h\nu)$  — коэффициенты поглощения и отражения.

На рис. 3, *a* приведен результат расчета  $\eta(h\nu)$  с учетом измеренных зависимостей  $\alpha(h\nu)$  и  $R(h\nu)$  (рис. 3, *б*) в широком спектральном интервале и при допущении, что  $\mu\tau = \text{const}$ . Как видно из рисунка, в области энергий фотонов  $h\nu = 1.7-3.0$  эВ квантовая эффективность постоянна, затем наблюдается некоторое уменьшение  $\eta(h\nu)$ , обусловленное влиянием поверхностной рекомбинации, а, начиная с энергии фотонов  $h\nu \geq 3.6$  эВ, увеличивается, удваиваясь при

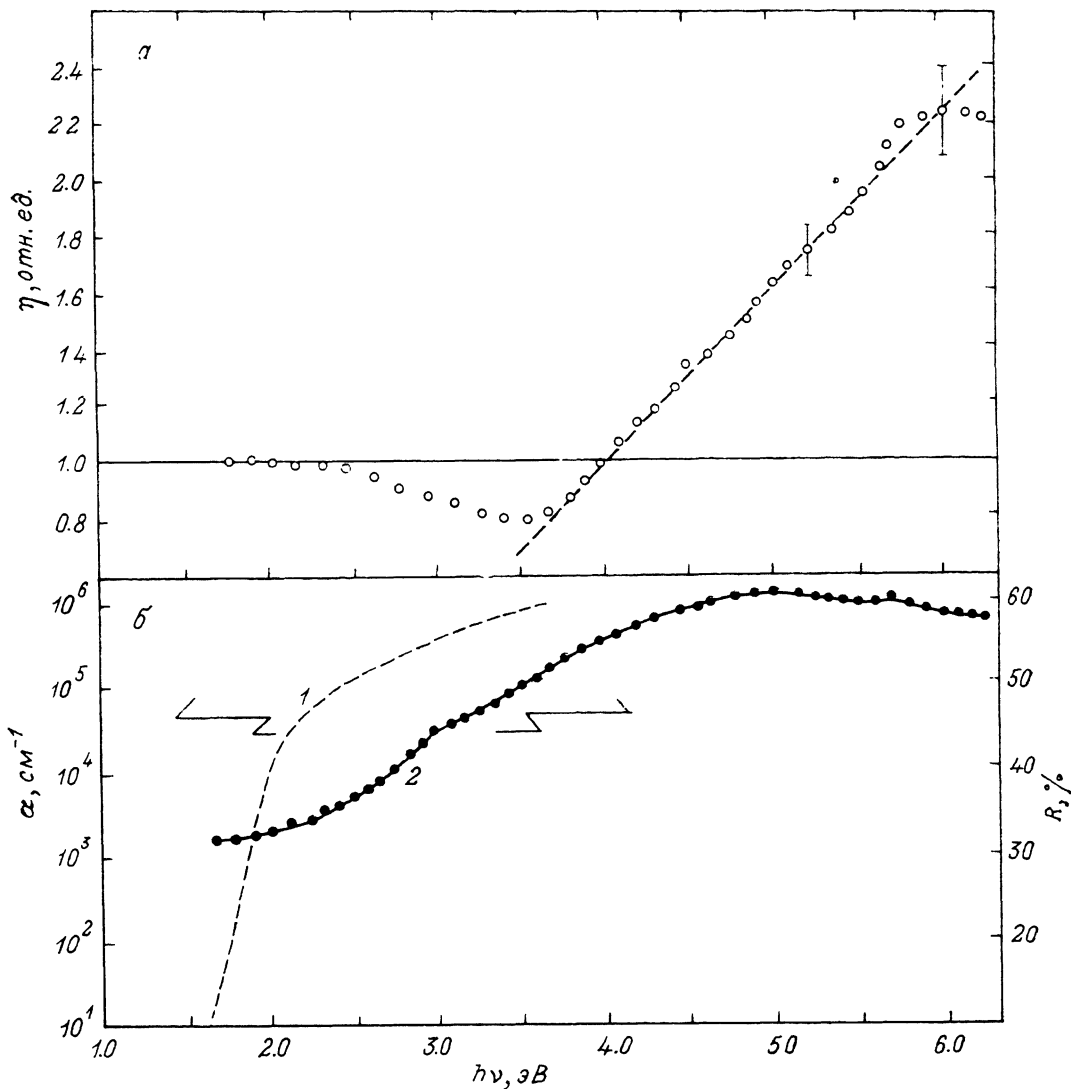


Рис. 3. Спектральная зависимость квантовой эффективности внутреннего фотоэффекта в  $a\text{-Si} : \text{H}$  (*a*).

1 —  $\alpha(h\nu)$ , 2 —  $R(h\nu)$  (*б*) при  $T=300$  К.

$h\nu \sim 6$  эВ. Скорость поверхностной рекомбинации можно изменять, варьируя технологическими параметрами осаждения пленок. Так, обработка пленок в атмосфере водорода приводит к ослаблению поверхностной рекомбинации.

Ход полученной спектральной зависимости  $\eta(h\nu)$  в УФ диапазоне позволяет утверждать, что в  $a\text{-Si} : \text{H}$  имеет место процесс ударной ионизации носителей заряда и этот процесс имеет явно выраженный пороговый характер.

Как видно из рис. 3, *a*, пороговая энергия увеличения квантовой эффективности составляет  $\epsilon_s = 3.6$  эВ. Наличие порога увеличения  $\eta(h\nu)$  означает, что при энергии возбуждающего света, равной или большей пороговой, фотоэлек-

трон (или фотодырка) приобретает кинетическую энергию, достаточную для ионизации еще одной электронно-дырочной пары.

Величина найденного порога  $\epsilon_i$  в  $a\text{-Si} : \text{H}$  удивительно хорошо совпадает с аналогичной величиной для кристаллического кремния [11]. Поскольку в аморфных полупроводниках правила отбора с учетом сохранения квазимпульса для дна зоны не работают, пороговая энергия ударной ионизации  $h\nu_i$  (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  $a\text{-Si} : \text{H}$  и в кристаллическом кремнии совпадают, говорит о том, что эти пороги определяются не  $\epsilon_i$ , а порогами новых оптических переходов в оптическом поглощении, при которых фотоносители в обоих случаях уже сразу имеют энергию, превосходящую пороги ударной ионизации. Правда, для такого вывода надо допустить, что зонные структуры  $a\text{-Si} : \text{H}$  и кристаллического кремния в области больших энергий совпадают.

Другой важной характеристикой процесса ударной ионизации является величина средней энергии образования электронно-дырочной пары  $\Delta_i$ , 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. 3, а) величина для  $a\text{-Si} : \text{H}$  оказалась равной  $\Delta_i = 2.4$  эВ, что заметно меньше аналогичной величины в кристаллическом кремнии  $\Delta_i = 3.62$  эВ [11]. Эта разница может быть отнесена за счет более благоприятных условий для ударной ионизации в  $a\text{-Si} : \text{H}$ , о чем уже говорилось выше, а также в [12].

Следует отметить, что высокая фоточувствительность структур с барьером Шоттки в УФ области также определяется процессом ударной ионизации, но в этом случае этот процесс происходит в присутствии сильного внутреннего электрического поля ( $10^4 - 10^5$  В/см<sup>2</sup>), что, вероятно, также дает вклад в умножение носителей заряда.

Таким образом показано, что:

а) на основе  $a\text{-Si} : \text{H}$  могут быть изготовлены структуры с барьером Шоттки, работающие как эффективные фотоприемники в видимом и УФ области спектра, причем изменением толщины  $i$ -слоя и его состава достигается смещение красной границы фоточувствительности;

б) увеличение квантовой эффективности внутреннего фотоэффекта в  $a\text{-Si} : \text{H}$  в УФ области обусловлено ударной ионизацией, имеющей пороговый характер при  $\epsilon_i$  3.6 эВ, и средняя энергия образования электронно-дырочной пары в процессе ударной ионизации составляет  $\Delta_i = 2.4$  эВ.

Авторы выражают благодарность В. Е. Челнокову за интерес и поддержку в данной работе.

#### Список литературы

- [1] Беркеллев А., Гольдберг Ю. А., Мелебаев Д., Царенков Б. В. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 8. С. 1532—1534.
- [2] Wilson A. D., Lyall H. // Appl. Opt. 1986. V. 24. N 25. P. 4530—39; P. 4540—46.
- [3] Горбенко Н. В., Косыченко Л. А., Махний В. П., Шейнкман М. К. // ЖПС. 1989. Т. 51. В. 2. С. 335—337.
- [4] Колдаев И. М., Лосев В. В., Орлов Б. М., Рухадзе Н. Д. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 4. С. 730—732.
- [5] Колдаев И. М., Лосев В. В., Орлов Б. М. // Письма ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 14. С. 853.
- [6] Вереничкова Р. Г., Санкин В. И. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1742—1746.
- [7] Атаев Ж., Васильев В. А., Волков А. С., Мездрогина М. М., Теруков Е. И. // Матер. конф. по фотоволт. явлениям в полупроводниках. Ташкент, 1989. С. 309—310.
- [8] Атаев Ж., Васильев В. А., Волков А. С., Мездрогина М. М., Теруков Е. И. // Письма ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 1. С. 47—50.
- [9] Ataev J., Chelnokov V. E., Terukov E. I., Vassilyev V. A., Volkov A. S. // Abs. Conf. Amorphous Silicon Technology-90. San Francisco, 1990.
- [10] Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П. и др. Электронная теория неупорядоченных полупроводников. М., 1981. 384 с.
- [11] Christensen O. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 2. P. 689—695.
- [12] Атаев Ж., Васильев В. А., Волков А. С., Кумеров Е., Теруков Е. И., Шведков И. В. // Письма ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 3. С. 81—85.