

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ИНЖЕКЦИОННОГО ФОТОПРИЕМНИКА НА ОСНОВЕ $pSi-nCdS-n^+CdS$ — СТРУКТУРЫ И НА ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ $pSi-nCdS$ — ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

И. Б. Сапаев, Ш. А. Мирсагатов

Физико-технический институт,  
Научно-производственное объединение «Физика — Солнце»,  
Академия Наук Узбекистана

Поступила в редакцию 13.05.2014

Определено распределение плотности поверхностных состояний в зависимости от величины поверхностного потенциала на гетерогранице  $nCdS/Si(p)$ . Установлено, что ультразвуковое облучение уменьшает плотности поверхностных состояний и это приводит к повышению спектральной и интегральной чувствительности фотодиода.

**Ключевые слова:** ультразвук, фотодиод, гетеропереход.

## ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОТОПРИЙМАЧА НА ОСНОВІ $pSi-nCdS-n^+CdS$ — СТРУКТУРИ І НА ГУСТИНИ ПОВЕРХНЕВИХ СТАНІВ $pSi-nCdS$ — ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

И. Б. Сапаев, Ш. А. Мирсагатов

Визначено розподіл щільності поверхневих станів в залежності від величини поверхневого потенціалу на гетерограниці  $nCdS/Si(p)$ . Встановлено, що ультразвукове опромінення зменшує щільності поверхневих станів і це призводить до підвищення спектральної і інтегральної чутливості фотодіода.

**Ключові слова:** ультразвук, фотодіод, гетероперехід.

## INFLUENCE OF THE ULTRASONIC IRRADIATION ON PROPERTIES OF THE INJECTION SENSOR BASED ON $pSi-nCdS-n^+CdS$ — STRUCTURE AND SURFACE STATES DENSITY $pSi-nCdS$ — HETEROJUNCTION

I. B. Sapaev, Sh. A. Mirsagatov

Determined distribution density of surface states depending on the magnitude of the surface potential at the  $nCdS/Si(p)$  heterojunction. It is established that ultrasonic processing of such photo diodes leads to reduction of the surface states density on the heterojunction interface and raises the spectral and integral sensitivity of photodiodes.

**Keywords:** ultrasonic, photodiode, heterojunction.

В последние годы проявляется значительный интерес к получению и исследованию гетеропереходов между полупроводниковыми соединениями  $A^2B^6$  и кремнием, особенно между сульфидом кадмия ( $CdS$ ) и кремнием ( $Si$ ) [1—4].

В этих работах показано, что  $pSi-nCdS$ -гетеропереход с низкой плотностью поверхностных состояний ( $N_{ss}$ ) является основным звеном  $pSi-nCdS-n^+CdS$ -структуры.

Частотные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) позволяют получить информацию

о границе раздела, и они показали наличие МДП-структуры.

Плотность поверхностных состояний МДП-структуры была стандартно определена по сдвигу экспериментальной  $C(V)$ -характеристики по отношению к расчетной кривой [5].

На рис. 1 приведена экспериментальная (1) и расчетная (2) вольт-фарадная характеристика типичного инжекционного фотоприемника на основе  $pSi-nCdS-n^+CdS$ -структуры.

Экспериментальная вольт-фарадная характеристика была снята на частоте тестового сигнала  $f = 10$  kHz при комнатной температуре.

Величина поверхностного потенциала ( $\psi_s$ ) при заданном напряжении смещения определялась как и в работе [6].

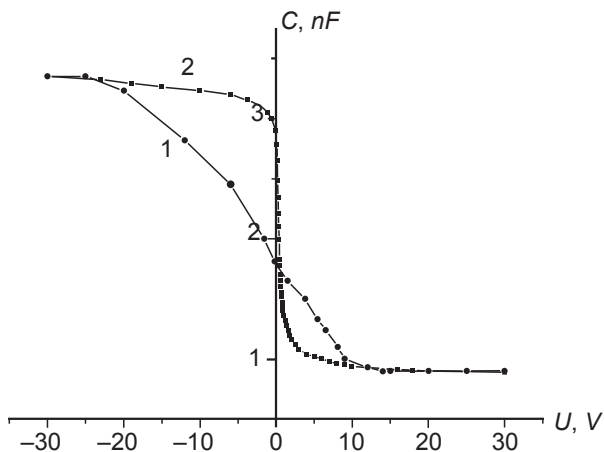


Рис. 1. Вольт-фарадная характеристика  $pSi-nCdS-n^+CdS$  структуры при частоте  $f = 10$  kHz,  $T = 300$  K. 1 — экспериментальная, 2 — расчетная кривые

Зависимость  $N_{ss}$  от  $\psi_s$  приведена на рис. 2. кр. 1. Кривая зависимости  $N_{ss}(\psi_s)$  имеет большую плотность поверхностных состояний при положительном поверхностном потенциале и она становится равной  $\sim 6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  при  $\psi_s = -0,24 \text{ eV}$ , которая соответствует данным работы [7], где приводится только значение интегральной плотности поверхностных состояний.

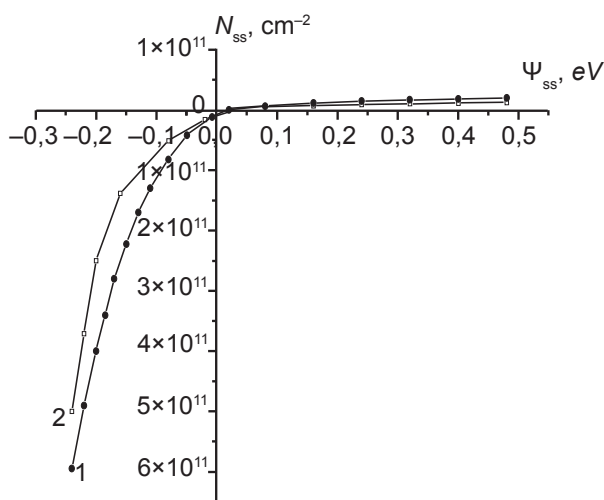


Рис. 2. Зависимость эффективной плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала до (кр. 1) и после (кр. 2) ультразвукового облучения

Величина  $N_{ss}$  в нижней половине запрещенной зоны намного меньше, чем верхней. Например,  $N_{ss} \approx 9,5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$  при  $\psi_s = 0,08 \text{ eV}$  и  $N_{ss} \approx 1,9 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  при  $\psi_s = 0,48 \text{ eV}$ .

Отсюда следует, что эффективная плотность поверхностных состояний в нижней половине запрещенной зоны имеет малые значения, и она мало изменяется по величине на энергетическом расстоянии  $\sim 0,48 \text{ eV}$  от середины запрещенной зоны.

Приведенные экспериментальные результаты подтверждают, что имеется  $pSi-nCdS$ -гетеропереход с низкой плотностью  $N_{ss}$ , несмотря на то, что постоянные кристаллических решеток сульфида кадмия и кремния отличаются друг от друга более чем на 7 % [8].

Эти экспериментальные результаты объясняются тем, что при получении гетероперехода образуется промежуточный слой, который сглаживает разницу постоянных решеток сульфида кадмия и кремния.

Таковыми промежуточными слоями могут быть: твердый раствор полупроводников или окисные слои  $SiO_x$ ,  $CdO_x$  и  $SO_x$ , которые образуются в процессе получения  $nCdS-pSi$ -гетеропары [4].

Далее, представляет интерес выявление взаимосвязи между плотностью поверхностных состояний  $nCdS-pSi$ -гетероперехода и с выходными параметрами  $pSi-nCdS-n^+CdS$ -структуры, такими как интегральная и спектральная чувствительности. Такая взаимосвязь должна проявляться при изменении  $N_{ss}$ . Плотности поверхностных состояний можно изменять технологическим путем или внешним воздействием.

В настоящее время считается установленным фактом, что ультразвуковое облучение (УЗО) оказывает влияние на дефектную структуру и электрофизические характеристики полупроводников и структур на их основе [9].

На рис. 3 приведена ВАХ характеристика  $pSi-nCdS-n^+CdS$ - структуры в темноте и при освещении, до и после УЗО с мощностью  $1 \text{ W/cm}^2$  и частотой  $f = 2,5 \text{ MHz}$  в течение 15 минут.

Исследование показывает, что УЗО не влияет на закономерность протекания тока в

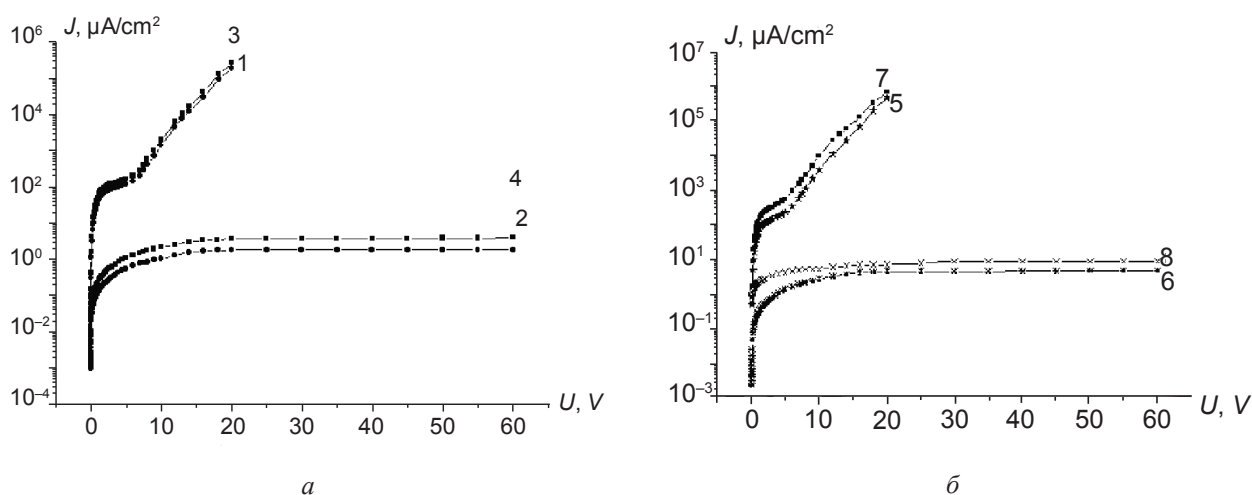


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика  $pSi-nCdS-n^+CdS$  структуры в полулогарифмическом масштабе: прямая ветвь в темноте (1) и при освещении  $E = 10 \text{ lux}$  (3) до ультразвукового облучения; обратная ветвь в темноте (2) и при освещении  $E = 10 \text{ lux}$  (4) до ультразвукового облучения; прямая ветвь в темноте (5) и при освещении  $E = 10 \text{ lux}$  (7) после ультразвукового облучения; обратная ветвь в темноте (6) и при освещении  $E = 10 \text{ lux}$  (8), после ультразвукового облучения

в темноте и при освещении, а лишь увеличивает величины токов при одном и том же значении напряжения смещения (см. рис. 3а и 3б кр. 1, 2, 3, 4 и 5, 6, 7, 8).

В прямой ветви ВАХ ток в темноте и при освещении увеличивается на  $\sim 20\%$ , (см. рис. 3б кр. 5, 7), а в обратной ветви он возрастает примерно в два раза (см. рис. 3б кр. 6, 8).

Эти результаты объясняются тем, что при включении  $pSi-nCdS-n^+CdS$ -структуры в прямом направлении тока, («+»-потенциал на  $pSi$ ) инжекция электронов идет из слоя  $nCdS$  в  $pSi$ -слой, и рекомбинационные процессы лимитируются плотностью поверхностных состояний, находящихся в нижней половине запрещенной зоны кремния.

Так как плотность поверхностных состояний в нижней половине запрещенной зоны после ультразвукового облучения (см. рис. 2, кр. 2) уменьшается, в пределах  $18\text{--}20\%$ , поэтому токи в темноте и на свете также настолько и увеличиваются. Вид зависимости  $N_{ss}(\psi_{ss})$  в верхней половине запрещенной зоны в результате после УЗО изменяется по сложной закономерности.

Динамика изменения  $N_{ss}$  от величины  $\psi_{ss}$  показывает (рис. 2, кр. 2), что для поверхностных состояний, находящихся вблизи середины запрещенной зоны, их плотность уменьшается примерно в 2 раза, а, для

поверхностных состояний, расположенных вдали от нее, (точнее при  $\psi_{ss} = -0,24 \text{ eV}$ ), их плотность уменьшается всего на  $17\%$  после ультразвукового облучения.

Отсюда следует, что дефекты, играющие роль рекомбинационных центров отжигаются сильнее.

В обратном направлении тока в структуре происходит инжекция электронов из  $pSi$  в  $nCdS$  слой и тогда рекомбинационные процессы, и время жизни электронов определяются поверхностными состояниями в верхней половине запрещенной зоны.

Так как  $N_{ss}$ , находящиеся вблизи середины запрещенной зоны уменьшаются примерно в два раза после УЗО, то поэтому токи в обратном направлении увеличиваются также примерно в два раза.

Таким образом, значения  $S_{int}$  и  $S_{\lambda}$  в прямом направлении тока возрастают примерно на  $20\%$  после УЗО при всех величинах интенсивностей белого света и мощностей лазерного облучения, а также напряжений смещения (табл. 1).

При обратном же направлении тока спектральная и интегральная чувствительности фотоприемника увеличиваются примерно в 2 раза после воздействия ультразвукового облучения (табл. 2).

Таблица 1

Зависимости интегральной чувствительности ( $S_{int}$ ), спектральной чувствительности ( $S_\lambda$ ) от освещенности ( $E_{lux}$ ), мощности лазерного облучения ( $P$ ) и напряжения смещения ( $U$ ), до и после ультразвукового облучения при прямом напряжении смещения

Белый свет				При лазерном облучении		
		До облучения	После облучения		До облучения	После облучения
$E$ (lux)	$U, V$	$S_{int}, \frac{A}{W}$	$S_{int}, \frac{A}{W}$	$P, \frac{\mu W}{cm^2}$	$S_\lambda, \frac{A}{W}$	$S_\lambda, \frac{A}{W}$
0,05	5	$0,26 \cdot 10^4$	$0,316 \cdot 10^4$	0,7	36	42,85
	10	$4,2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$		550	660
	20	$4,47 \cdot 10^6$	$5,4 \cdot 10^6$		50358	60428
1	5	$0,2 \cdot 10^3$	$0,23 \cdot 10^3$	50	7,4	8,86
	10	$3,32 \cdot 10^3$	$3,98 \cdot 10^3$		121,5	145,8
	20	$3,4 \cdot 10^5$	$4,1 \cdot 10^5$		8326	9992

Таблица 2

Зависимости интегральной чувствительности ( $S_{int}$ ), спектральной чувствительности ( $S_\lambda$ ) от освещенности ( $E_{lux}$ ), мощности лазерного облучения ( $P$ ) и напряжения смещения ( $U$ ), до и после ультразвукового облучения при обратном напряжении смещения

Белый свет				При лазерном облучении		
		До облучения	После облучения		До облучения	После облучения
$E$ (lux)	$U, V$	$S_{int}, \frac{A}{W}$	$S_{int}, \frac{A}{W}$	$P, \frac{\mu W}{cm^2}$	$S_\lambda, \frac{A}{W}$	$S_\lambda, \frac{A}{W}$
0,1	5	40,1	80,2	10	1,31	2,62
	10	47,36	94,72		1,883	3,766
	60	76	152		3,28	6,56

В резюме можно отметить, что плотностно-гетеропереходе являются основным факторами поверхностных состояний в  $pSi-nCdS$ -структуре, влияющим на спектральную и

интегральную чувствительности инжекционного фотоприемника на основе  $p\text{Si-nCdS-n}^+\text{CdS}$ -структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. П., Рубец В. П. Эффект переключения в гетеропереходах Si-CdS, синтезированных в резко неравновесных условиях // ФТП. — 2002. — Т. 36, вып. 7. — С. 843—846.
2. Трегулов В. В. Исследование фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе гетероструктуры CdS/Si(p) // Вестник ТГТУ. — 2010. — Т. 16, вып. 4. — Transactions TSTU. — С. 892—896.
3. Саидов А. С., Лейдерман А. Ю., Усмонов Ш. Н., Холиков К. Т. Вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ - структур на основе непрерывного твердого раствора  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$  // ФТП. — 2009. — Т. 43, вып. 4. — С. 436—438.
4. Сапаев И. Б. Особенности электрических и фотоэлектрических свойств Au- $p\text{Si-nCdS-n}^+\text{CdS}$  гетероструктур // ДАН. — Узбекистан. — 2013, вып. 2. — С. 27—29.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов., том 1 под редакцией д. ф. — м. н. Р. А. Суриса. — М.: «Мир», 1984.
6. Мирсагатов Ш. А., Утениязов А. К. Инжекционный фотодиод на основе  $p$ -CdTe // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, вып. 1. — С. 70—76.
7. Трегулов В. В. Способ определения плотности поверхностных состояний CdS/Si(p) на основе анализа вольт-фарадных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. — 2012. — № 3 (23). — С. 124—132.
8. Милнс А., Фойхт Д. // Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. Под ред. проф. В. С. Вавилова. — М.: «Мир», 1975.
9. Островский И. В., Стобленко Л. П., Надточий А. Б. Образование поверхностного упроченного слоя в бездислокационном кремнии при ультразвуковой обработки // ФТП. — 2000. — Т. 34, вып. 3. — С. 257—260.

## LITERATURA

1. Belyaev A. P., Rubec V. P. Effekt pereklyucheniya v geteroperehodah Si-CdS, sintezirovannyh v rezko neravnovesnyh usloviyah // FTP. — 2002. — Vol. 36, vyp. 7. — P. 843—846.
2. Tregulov V. V. Issledovanie fotoelektricheskogo preobrazovatelya solnechnoj energii na osnove geterostruktury CdS/Si(p) // Vestnik TGTU. — 2010. — Vol. 16, vyp. 4. — Transactions TSTU. — P. 892—896.
3. Saidov A. S., Lejderman A. Yu., Usmonov Sh. N., Holikov K. T. Vol't-ampernaya harakteristika  $p$ - $n$ - struktur na osnove neprepyvnogo tverdogo rastvora  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$  // FTP. — 2009. — Vol. 43, vyp. 4. — P. 436—438.
4. Sapaev I. B. Osobennosti elektricheskikh i fotoelektricheskikh svojstv Au- $p\text{Si-nCdS-n}^+\text{CdS}$  geterostruktur // DAN. — Uzbekistan. — 2013, vyp. 2. — P. 27—29.
5. Zi S. Fizika poluprovodnikovyyh priborov, vol 1. pod redakciej d. f. — m. n. R. A. Surisa. M.: «Mir», 1984.
6. Mirsagatov Sh. A., Uteniyazov A. K. Inzhektionnyj fotodiod na osnove  $p$ -CdTe // Pis'ma v ZhTF. — 2012. — Vol. 38, vyp. 1. — P. 70—76.
7. Tregulov V. V. Sposob opredeleniya plotnosti poverhnostnyh sostoyanij CdS/Si(p) na osnove analiza vol't-faradnyh harakteristik // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. — 2012. — No. 3 (23). — P. 124—132.
8. Milns A., Fojht D. // Geteroperehody i perehody metall-poluprovodnik. Pod red. prof. V. S. Vavilova. — M.: «Mir», 1975.
9. Ostrovskij I. V., Stoblenko L. P., Nadtochij A. B. Obrazovanie poverhnostnogo uprochnennogo sloya v bezdyslokacionnom kremnii pri ul'trazvukovoj obrabotki // FTP. — 2000. — Vol. 34, vyp. 3. — P. 257—260.