

УДК

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОТЖИГ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ ИНЖЕКЦИОННОГО ФОТОДИОДА $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$

© 2015 г. Ш. А. Мирсагагов*, И. Б. Сапаев*, Ж. Т. Назаров**

*Физико-технический институт, Научно-производственное объединение
“Физика – Солнце” Академии наук Узбекистана,
e-mail: mohim@inbox.ru

**Навоийский государственный горный институт, Узбекистан

Поступила в редакцию 26.01.2014 г.

Исследовано влияние ультразвука на электрофизические и световые характеристики инжекционного фотодиода $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$. Обнаружено, что ультразвуковая обработка таких фотодиодов приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на границе раздела гетероперехода, что объясняется отжигом дефектов. Это повышает спектральную и интегральную чувствительности фотодиодов.

DOI: 10.7868/S0002337X15010145

В настоящее время считается установленным фактом, что ультразвуковое облучение (УЗО) оказывает влияние на дефектную структуру и электрофизические характеристики полупроводников [1–6]. К преимуществам УЗО по сравнению с термическим отжигом и радиационным облучением можно отнести следующие особенности:

1) поглощение ультразвуковых волн в твердом теле происходит преимущественно в областях нарушения периодичности его кристаллической решетки и поэтому ультразвуковое воздействие носит более локальный характер; 2) применение ультразвуковых волн различной поляризации и типа позволяет повысить избирательность влияния; 3) путем подбора частоты ультразвуковых колебаний можно достичь резонансных превращений в дефектной подсистеме.

Цель данной работы состоит в исследовании влияния УЗО на электрические и фотоэлектрические свойства инжекционного фотодиода $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$. Такие фотоприемники созданы и исследованы в работах [7, 8]. Прямым направлением тока в структуре считается такое, когда к $p\text{-Si}$ -контакту прикладывается положительный потенциал, а обратным – отрицательный. Анализ ВАХ показывает, что структура обладает выпрямляющими свойствами и ее коэффициент выпрямления K (определяемый как отношение прямого и обратного тока при фиксированном напряжении $U = 20$ В) составляет $\approx 10^5$. На рис. 1 приведена ВАХ структуры $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$ в темноте и на свету до и после УЗО с мощностью $1 \text{ Вт}/\text{см}^2$, частотой тестового сигнала $f = 2.5 \text{ МГц}$ в течение 15 мин. Проведенное исследование показывает, что УЗО не влияет на закономерность

протекания тока в структуре в прямой и обратной ветвях ВАХ в темноте и на свету, а лишь увеличивает величины тока при одном и том же значении напряжения смещения (рис. 1).

Освещение структур проводилось лазером ЛГ-75 с мощностью излучения $10 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ – $0.75 \text{ мВт}/\text{см}^2$ и с длиной волны 0.625 мкм , а также лампой накаливания, которая по своим параметрам практически соответствует эталонной лампе, у которой в 1 люмене мощность электромагнитного излучения в видимой области спектра составляет $9.1 \times 10^{-3} \text{ Вт}$ [9]. В прямой ветви ВАХ как в темноте, так и на свету ток увеличивается на $\approx 20\%$, а в обратной ветви возрастает примерно в 2 раза.

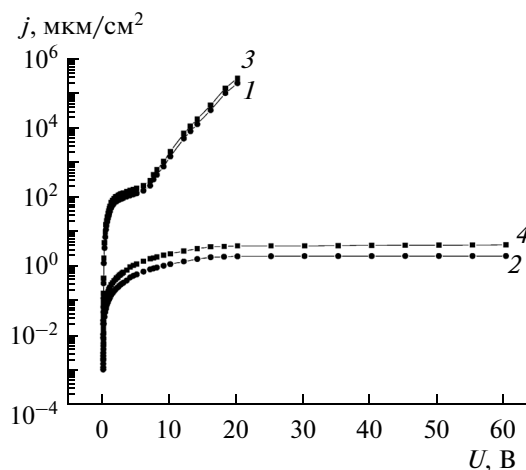


Рис. 1. Темновая ВАХ структуры $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$ в полулогарифмическом масштабе: 1 – прямая ветвь до УЗО, 2 – обратная ветвь до УЗО, 3 – прямая ветвь после УЗО, 4 – обратная ветвь после УЗО.

Таблица 1. Зависимости интегральной чувствительности (S_{int}), спектральной чувствительности (S_λ) от освещенности (E), мощности лазерного облучения (P) и напряжения смещения (U) до и после УЗО при прямом направлении тока

E	U	S_{int} , А/Вт		P	S_λ , А/Вт	
		до	после		до	после
на свету				при лазерном облучении		
0.05	5	0.2×10^4	0.316×10^4	0.7	36	42.85
	10	4.2×10^4	5×10^4		550	660
	15	3.21×10^5	3.85×10^5		3057	3669
	20	4.47×10^6	9.76×10^6		50358	60428
0.1	5	0.2×10^4	0.195×10^4	10	13.3	16
	10	2.6×10^4	3.1×10^4		200	240
	15	1.87×10^5	2.24×10^5		1120	1344
	20	3×10^6	3.62×10^6		23356	28027.2
1	5	0.2×10^3	0.23×10^3	50	7.4	8.86
	10	3.32×10^3	3.98×10^3		121.5	145.8
	15	1.98×10^4	2.37×10^4		778.7	934.5
	20	3.4×10^4	4.1×10^5		8326	9992
10	5	0.2×10^2	0.24×10^2	100	4.56	5.47
	10	4×10^2	4.75×10^2		75.24	90.29
	15	2.31×10^3	2.77×10^3		440.25	528.3
	20	4.5×10^4	5.4×10^4		4483.2	5379.84

В табл. 1 и 2 приведены значения спектральной (S_λ) и интегральной (S_{int}) чувствительности при различных интенсивностях белого света и лазерного облучения с $\lambda = 0.625$ мкм, при различных мощностях и при разных значениях напряжения смещения до и после УЗО в прямом и обратном направлениях тока. Как видно из табл. 1, значения S_{int} и S_λ в прямом направлении тока возрастают примерно на 20% после УЗО при всех интенсивностях белого света и мощностях лазерно-

Таблица 2. Зависимости интегральной чувствительности (S_{int}), спектральной чувствительности (S_λ) от освещенности (E_{lux}), мощности лазерного облучения (P) и напряжении смещения (U) до и после ультразвукового облучения при обратном напряжении смещения

E	U	S_{int} , А/Вт		P	S_λ , А/Вт	
		до	после		до	после
на свету				при лазерном облучении		
0.1	5	40.1	80.2	10	1.31	2.62
	10	47.36	94.72		1.883	3.766
	60	76	152		7	13.8

го облучения, а также напряжения смещения. В обратном направлении тока спектральная и интегральная чувствительности фотоприемника более чем в 2 раза увеличиваются после УЗО (табл. 2). Кроме этого, абсолютные значения S_{int} и S_λ в обратном направлении на ≈ 4 порядка меньше, чем их величины в прямом направлении тока. В то же время спектральная чувствительность существенно больше, чем S_λ идеального фотоприемника: у идеального фотоприемника $S_\lambda = 0.5$ А/Вт [10] при $\lambda = 0.625$ мкм. В исследуемой структуре при этой длине волны спектральная чувствительность равна 1.31 А/Вт при мощности излучения $P = 10$ мкВт/см² и $U = 5$ В, а при больших значениях напряжения смещения S_λ еще больше. В обратной ветви ВАХ сравнительно малые значения S_{int} и S_λ связаны с физическими процессами в базе структуры и появлением сублинейного участка. В работах [11, 12] подробно проанализировано появление сублинейного участка ВАХ, суть которого заключается в наличии встречных диффузионных и дрейфовых токов в высокоомной базе структуры. Появление протяженного сублинейного участка в обратной ВАХ структуры p -Si/ n -CdS/ n^+ -CdS показывает, что из гетероперехода p -Si/ n -CdS инжектируются электроны в высокоомную базу (n -CdS) и изо-

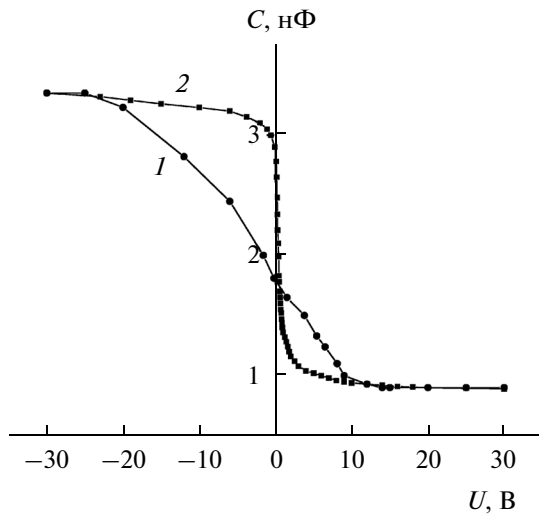


Рис. 2. ВФХ структуры $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$ при $f = 10$ кГц, $T = 300$ К: 1 – экспериментальная, 2 – расчетная кривые.

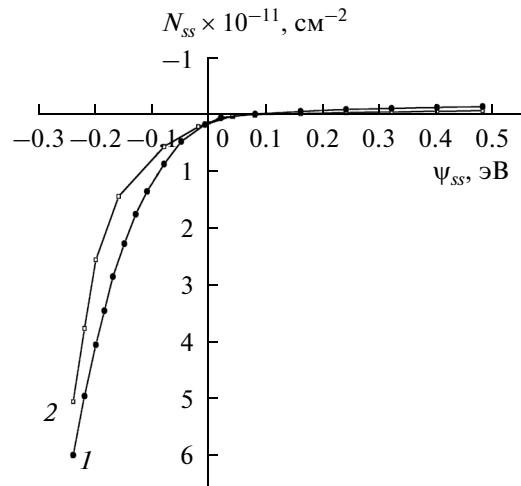


Рис. 3. Зависимости эффективной плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала до (1) и после (2) УЗО.

типный переход $n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$ является идеальным, его высота потенциального барьера повышается с увеличением приложенного обратного напряжения смещения (положительное напряжение на слой $n^+\text{-CdS}$) [9], в результате чего возле изотипного перехода $n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$ аккумулируются неосновные неравновесные носители (дырки) и создаются диффузионные токи, направленные навстречу дрейфовым и диффузионным токам, идущим от гетероперехода $p\text{-Si}/n\text{-CdS}$. В [11, 12] впервые было показано, что встречные диффузионные и дрейфовые токи приводят к “инжекционному обеднению” базы и происходит их взаимная компенсация. Появление сублинейного участка ВАХ в широком диапазоне напряжения смещения ($U \approx 10\text{--}60$ В) показывает, что область взаимной компенсации дрейфовых и диффузионных потоков неравновесных носителей расширяется и сопротивление базы, а также напряженность электрического поля в ней увеличиваются, что вызывает повышение скорости амбиполярного дрейфа. Вышеизложенные экспериментальные результаты объясняются тем, что прямые токи в исследуемой структуре в основном лимитируются рекомбинационными процессами, за которые ответственны поверхностные состояния в нижней половине запрещенной зоны, а обратные токи определяются поверхностными состояниями, находящимися в верхней половине запрещенной зоны кремния на границе раздела гетероперехода $p\text{-Si}/n\text{-CdS}$. Если плотность поверхностных состояний (N_{ss}) намного больше в верхней запрещенной зоне, чем в нижней, то поверхностные состояния отжигаются лучше при УЗО. Для подтверждения этой версии была исследована вольт-фарадная характеристика (ВФХ).

Частотные вольт-фарадные характеристики позволяют получить информацию о границе раздела, и они показали наличие МДП-структуры в образцах. Плотность поверхностных состояний МДП-структуры была стандартно определена по сдвигу экспериментальной $C(U)$ -характеристики по отношению к расчетной кривой [13]. На рис. 2 приведена экспериментальная (1) и расчетная (2) вольт-фарадные характеристики типичного инжекционного фотоприемника на основе структуры $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$. Экспериментальная вольт-фарадная характеристика была снята на частоте тестового сигнала $f = 10$ кГц при комнатной температуре. Величина поверхностного потенциала (ψ_s) при заданном напряжении смещения определялась, как в работе [14]. Зависимость N_{ss} от ψ_s приведена на рис. 3. Зависимость $N_{ss}(\psi_s)$ имеет большую плотность поверхностных состояний при положительном поверхностном потенциале, она становится равной $\approx 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при $\psi_s = -0.24$ эВ, что соответствует данным [15], где приводится значение только интегральной плотности поверхностных состояний. Величина N_{ss} в нижней половине запрещенной зоны намного меньше, чем в верхней: $N_{ss} \approx 9.5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ при $\psi_s = 0.08$ эВ и $N_{ss} \approx 1.9 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ при $\psi_s = 0.48$ эВ.

Отсюда следует, что эффективная плотность поверхностных состояний в нижней половине запрещенной зоны мала и слабо изменяется на энергетическом расстоянии ≈ 0.48 эВ от середины запрещенной зоны. Приведенные экспериментальные результаты подтверждают, что имеется гетеропереход $p\text{-Si}/n\text{-CdS}$ с низкой N_{ss} , несмотря на то что постоянные кристаллических решеток сульфида кадмия и кремния отличаются друг от друга более чем на 7% [16]. Это объясняется тем,

что при формировании гетероперехода образуется промежуточный слой, который сглаживает разницу постоянных решеток сульфида кадмия и кремния. Таким промежуточным слоем может быть твердый раствор полупроводников или SiO_x , CdO_x и SO_x , которые образуются в процессе получения гетеропары $n\text{-CdS}/p\text{-Si}$ [8].

Проведенные емкостные измерения до и после УЗО подтверждают взаимосвязанность механизмов протекания токов в структуре с поверхностными состояниями гетероперехода $p\text{-Si}/n\text{-CdS}$.

Так как плотность поверхностных состояний в нижней половине запрещенной зоны после УЗО (см. рис. 3, кривая 2) уменьшается в пределах 18–20%, токи в прямом направлении примерно настолько увеличиваются в темноте и на свету. В результате зависимость $N_{ss}(\psi_{ss})$ в верхней половине запрещенной зоны в после УЗО изменяется по сложной закономерности. Динамика изменения N_{ss} от ψ_s после УЗО показывает (рис. 3, кривая 2), что для поверхностных состояний, находящихся вблизи середины запрещенной зоны, плотность уменьшается примерно в 2 раза, а для поверхностных состояний, расположенных вдали от нее (точнее при $\psi_{ss} = -0.24$ эВ), плотность уменьшается всего на 17%. Отсюда следует, что дефекты, играющие роль рекомбинационных центров, отжигаются сильнее, поэтому темновые и световые токи в обратном направлении увеличиваются примерно в 2 раза. Таким образом, значения S_{int} и S_λ 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 после УЗО увеличиваются примерно в 2 раза (табл. 2).

В заключение можно отметить, что плотности поверхностных состояний в гетеропереходе $p\text{-Si}/n\text{-CdS}$ являются основным фактором, влияющим на спектральную и интегральную чувствительности инжекционного фотоприемника на основе структуры $p\text{-Si}/n\text{-CdS}/n^+\text{-CdS}$.

УЗО приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на границе раздела гетероперехода $p\text{-Si}/n\text{-CdS}$ и к возрастанию спектральной и интегральной чувствительностей инжекционных фотоприемников на основе структуры $p\text{-Si}-n\text{-CdS}-n^+\text{-CdS}$, как в прямом так и в обратном направлении токов. При этом величины S_{int} и S_λ увеличиваются примерно в 2 раза в обратном направлении тока, а в прямом направлении они возрастают на $\approx 20\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранский П.И., Беляев А.Е., Коширенко С.М. и др. Механизм изменения подвижности носителей заряда при ультразвуковой обработке полупроводниковых твердых растворов // ФТП. 1990. Т. 32. № 7. С. 2159–2161.
2. Островский И.В., Стобленко Л.П., Надточий А.Б. Образование поверхностного упроченного слоя в бездислокационном кремнии при ультразвуковой обработки // ФТП. 2000. Т. 34. № 3. С. 257–260.
3. Заверюхина Е.Б., Заверюхина Н.Н., Лезилова Л.Н., Заверюхин Б.Н. и др. Акустостимулированное расширение коротковолнового диапазона спектральной чувствительности $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ солнечных элементов // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 1. С. 54.
4. Олих О. Я. Особенности динамических акустоиндуцированных изменений фотоэлектрических параметров кремниевых солнечных элементов // ФТП. 2011. Т. 45. № 6. С. 816.
5. Davletova A., Karazhanov S.Zh. Open-Circuit Voltage Decay Transient in Dislocation-Engineered // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. № 165. P. 107.
6. Пашаев И.Г. Влияние различных обработок на свойства диодов Шоттки // ФТП. 2012. Т. 46. № 8. С. 1108.
7. Сапаев И.Б. Особенности электрических и фотоэлектрических свойств $\text{Au}-p\text{Si}-n\text{CdS}-n^+\text{CdS}$ гетероструктур // ДАН. Узбекистан. 2013. Вып. 2. С. 27.
8. Мирсагатов Ш.А., Сапаев И.Б. // Инжекционный фотодиод на основе фоточувствительной поликристаллической пленки CdS . IV Международная конференция по актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред. Самарканд (29–31 мая) 2013. С. 157–158.
9. Фриш Э. Оптические методы измерений. Ч. I. Изд. Ленинградского университета, 1976. С. 126.
10. Амброзьяк А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. М.: Сов. радио, 1970. С. 392.
11. Адирович Э.И., Карагеоргий-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М.: Сов. радио, 1978. С. 126.
12. Карагеоргий-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. // Фоточувствительность полупроводниковых структур с глубокими примесями. Ташкент: ФАН, 1981. С. 200.
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1 / Под ред. Суриса Р.А. М.: Мир, 1984. С. 386.
14. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. Инжекционный фотодиод на основе $p\text{-CdTe}$ // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 1. С. 70–76.
15. Трегулов В.В. Способ определения плотности поверхностных состояний $\text{CdS}/\text{Si}(p)$ на основе анализа вольт-фарадных характеристик // Изв. вузов. Поволжский регион. 2012. Т. 23. № 3. С. 124–132.
16. Милнс А., Фойхт Д. // Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник / Под ред. Вавилова В.С. М.: Мир, 1975. С. 425.