

06.3; 07; 12

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДВОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ $GaAs - AlGaAs$

А.П. З д е б с к и й, И.Б. П у з и н,  
М.К. Ш е й н к м а н, Г.К. Ш е р в а р л ы

Ультразвуковое воздействие дупороговой интенсивности, приводящей не к генерации новых, а к преобразованию, а в некоторых случаях и к устранению уже имеющихся точечных дефектов и их комплексов, позволяет целенаправленно модифицировать дефектную структуру полупроводниковых материалов [1, 2] и улучшать характеристики приборов, содержащих  $PN$  - или гетеропереход [3].

С другой стороны, установлено [4, 5], что тепловая обработка светоизлучающих двойных гетероструктур (СДГС) (как с током инжекции неосновных носителей, так и без него) приводит к возрастанию мощности излучения за счет улучшения свойств  $pP$ -гетерограницы. Если учесть, что для улучшения параметров СДГС посредством тепловой обработки требуются десятки и даже сотни часов, а с помощью ультразвуковой обработки (УЗО) аналогичный результат может быть получен в течение одного часа, то ясно, что исследование влияния УЗО на СДГС представляет несомненный интерес. Ниже приведены результаты, показывающие, что УЗО может быть использована с целью уменьшения или устранения нелинейностей на ватт-амперных характеристиках СДГС на основе  $GaAs - AlGaAs$ . Исследованные СДГС с оксидной или диффузионной изоляцией полоскового электрода были получены методом жидкофазной эпитаксии и состояли из следующих слоев:  $GaAs(Si)$  - подложка  $n$ -типа;  $N-Al_{0.35}Ga_{0.65}As(Sn)$ ;  $p-Al_{0.05}Ga_{0.95}As(Si)$ ;  $p-Al_{0.35}Ga_{0.65}As(Ge)$ . Толщина активного  $p$ -слоя 0.3 мкм. УЗО подвергались только СДГС с нелинейными ватт-амперными характеристиками (ВтАХ), имеющие исходно плохие электрофизические характеристики (ЭХ), а именно: аномально низкие напряжения пробоя и микроплазмы на обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ), большие избыточные токи в области малых прямых и обратных напряжений.

ЭХ снимались на автоматической установке [6], а профиль легирования в активной области СДГС определялся по методу  $C-U$ -профилирования [7] на установке [8], автоматизированной посредством аппаратуры КАМАК и ЭВМ типа ДЗ-28. Обработка СДГС осуществлялась на частоте 20 МГц продольной ультразвуковой волной определенной амплитуды, распространяющейся параллельно плоскости гетероперехода. Одной дозе соответствует обработка в течение 1-го часа.

Группа	Параметр № СДГС	$I_{\Pi}$ (мА)	$I$ (мА) при $P=6\text{ мВт}$	$R_{\text{посл}}$ (Ом)	$R_{\text{д}} (I=1_{\Pi})$ (Ом)	$V_{\text{проб}}$ (В)	$V_{\text{отс}}^{(*)}$ (В)	Приме- чание						
1	1	106*	137*	1.35	2.0	7.6	1.5	1						
				1.24	1.77	0		2						
				1.24	1.77	7.5		5						
	2	101*	138	129	1.56	2.7	3	1.5	1					
					1.13	2.26	1		2					
					1.03	2.37	1		3					
					1.03	2.37	16.5		5					
	3	101*	147	142	1.45	3.8	4.7*	1.5	1					
					0.81	2.26			2, 3					
					0.81	2.53			5					
	4	91*	129*	129*	1.24	2.1	8.1	1.5	1					
					0.76	2.6			6.8	2, 3, 4				
					0.6	2.3			7.8	5				
	5	128	159	159	1.3	1.65	8.1	1.47	1, 5					
					6	95*			143*	1.5	2.83	0.8	1.53	1
										1.24	2.45	0.8	2	
1.24	2.34	0.3	5											
7	81	134	122	1.56	4.1	0.2	1.73	1						
				73	122			1.67	4.54	0	2, 5			
8	115*	151*	150	2.07	2.57	0.7*	1.58	1						
				150	2.29			2.63	2					
				150	1.96			2.32	5					
9	87	138	147	1.56	2.4	16.5*	1.5	1						
				93	147			1.7	2.56	2				
				95	150			1.45	2.13	5				
10	81*	124	124	2.63	5	6.9	1.64	1						
				124	2.63			4.84	6.9	2				
				136	2.4			4.57	0	5				
11	107	-	-	2.84	5.1	4.5	1.7	1						
				111	-			3.05	5.14	5	2			
				115	-			2.7	4.3	1	5			
12	101*	-	-	2.9*	5.94*	0.3	1.9	1						
				-	-			0	2, 5					
13	72	-	-	1.88	3.85	5.2	1.54	1						
				78	-			1.6	3.17	5.5	2, 5			
14	122	158	-	3.16	4	6.4	1.52	1						
				128	-			2.68	3.34	6.8	2, 5			
15	109	-	-	1.6	2.12	13.4	1.5	1						
				-	-			1.13	2.3	0.35	2			
16	100	167	-	1.6*	2.15*	7.6	1.57	1						
				-	-			0	2					

Примечания: 1 - до УЗО, 2 - после 1-й дозы УЗО, 3 - после 2-й дозы УЗО, 4 - после 3-ей дозы УЗО, 5 - после хранения в темноте в течение 30-ти дней после последней обработки УЗО. Значок (x) означает, что указанный параметр остался неизменным.

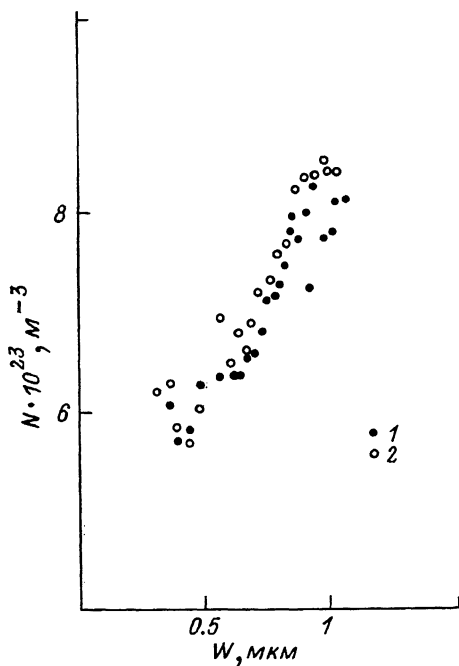


Рис. 1. Профиль концентрации легирующей примеси СДГС № 3 до (1) и после (2) 1-й дозы УЗО.

Результаты влияния УЗО на электрооптические параметры 16-ти из исследованных СДГС приведены в таблице, где  $I_{\Pi}$  - пороговый ток,  $P$  - мощность излучения,  $R_{\Pi}$  - последовательное сопротивление, определяемое по наклону зависимости  $I(dV/dI)$  от  $I$  [9] и представляющее собой сопротивление толщи полупроводника и сопротивление контактов,  $R_{д}(I_{\Pi})$  - дифференциальное сопротивление на частоте 10 кГц при токе, равном  $I_{\Pi}$ ,  $V_{\text{проб}}$  - величина напряжения пробоя на обратной ветви ВАХ и  $V_{\text{отс}}$  - величина напряжения,

отсекаемого на оси  $V$  экстраполяцией прямой ветви ВАХ к  $I = 0$ .

Как видно из таблицы, у половины образцов после УЗО электрооптические параметры либо остались неизменными, либо улучшились (группа 1), у другой половины результаты УЗО резко отрицательны (группа 2). Можно предположить, что причина заключается в избирательном действии УЗО на определенного типа точечные дефекты и /или дислокации, которые ответственны за „плохое“ поведение ВАХ и ВАХ. При наличии других типов точечных дефектов и/или дислокаций УЗО приводит к порче СДГС.

Так как после УЗО больше всего изменяются обратные ветви ВАХ, за поведение которых отвечает  $N$  р-гетеропереход (см. таблицу) (в частности у СДГС из 2-й группы падает напряжение  $V_{\text{проб}}$

и изменяется обычно в худшую сторону, форма обратной ветви ВАХ), то можно сделать вывод, что УЗО действует на дефекты, расположенные вблизи  $N$  р-гетерограницы. С другой стороны, результаты С-V-профилеирования СДГС, обратная ветвь ВАХ которых после УЗО позволяла это сделать, показали, что рР-гетерограница СДГС не подверглась существенным изменениям (см. рис. 1). Кроме того, кривые зависимости  $R$  от  $I$  после УЗО идут ниже исходных. Поскольку  $R = dV/dI = R_{\Pi} + (pKT/q) I^{-1}$  [9], т.е. в области токов до порога ( $I \lesssim I_{\Pi}$ ) величина дифференциального сопротивления определяется суммой последовательного сопротивления  $R_{\Pi}$  и падающего с ростом тока нелинейного дифференциального сопротивления  $N$ р-гетероперехода, то уменьшение  $R$  после УЗО также свидетельствует о влиянии УЗО на  $N$ р-гетерограницу. После УЗО падает и величина  $R_{\Pi}$ , что свидетельствует о влиянии УЗО и на объемные характеристики полупроводникового материала. При этом С-V-профилеирование на тех СДГС, где оно оказалось возможным, не показало существенных изменений концентрации примеси в области рР-гетероперехода. Поэтому, вероятней всего, уменьшение  $R_{\Pi}$  происходит за счет изменений в слое  $N-Ga_{0.65}Al_{0.35}As$  и или в  $p-CaA$ -подложке.

Как видно из таблицы, особый интерес вызывают СДГС № 1 и № 2 из 1-й группы. Они отличаются той особенностью, что после УЗО резко ухудшились их обратные ветви ( $V_{\text{проб}}$  стало равным 0 и 3 В соответственно). Через месяц ЭХ этих образцов были изменены снова. Оказалось, что значение  $V_{\text{проб}}$  СДГС № 1 восстановилось, а у СДГС № 2 оно сильно возросло, при этом существенно улучшилось поведение обратной ветви ВАХ - мягкий пробой сменился на резкий, лавинный. На рис. 2,а приведены электрофизические характеристики СДГС № 2 до УЗО, сразу после УЗО и через месяц после хранения в темноте при  $T = 300$  К. Видно, что пороговый ток  $I_{\Pi}$  остался неизменным, несколько возросла дифференциальная квантовая эффективность  $\eta$  и сильно, примерно на 1 мВт, возросла мощность излучения в области больших токов. При этом излом на  $V$ АХ сохранился, но наступил уже при больших значениях тока и мощности излучения, т.е. увеличился линейный участок  $V$ АХ, что является явным свидетельством положительного влияния УЗО. Налицо также уменьшение величины  $R_{\Pi}$  - в 1.5 раза уменьшился наклон зависимости  $I$  ( $dV/dI$ ) -  $I_{\Pi}^2$  (см. таблицу) [9]. В данном случае именно уменьшение величины  $R_{\Pi}$  и может быть причиной увеличения мощности излучения в области больших токов. На рис. 2,б приведены соответствующие изменения прямой и обратной ветвей ВАХ СДГС № 2, а на рис. 3 - профиль распределения легирующей примеси в активном слое СДГС № 2 до УЗО и через месяц после УЗО.

Из рис. 2,б видно, что поведение как прямой, так и обратной ветвей ВАХ СДГС № 2 до УЗО свидетельствует о наличии значительного шунтирующего сопротивления. После 3-й дозы УЗО сильно возросли избыточные токи на обеих ветвях ВАХ, ухудшилась и форма обратной ветви ВАХ в области пробоя. При этом, по-видимому-

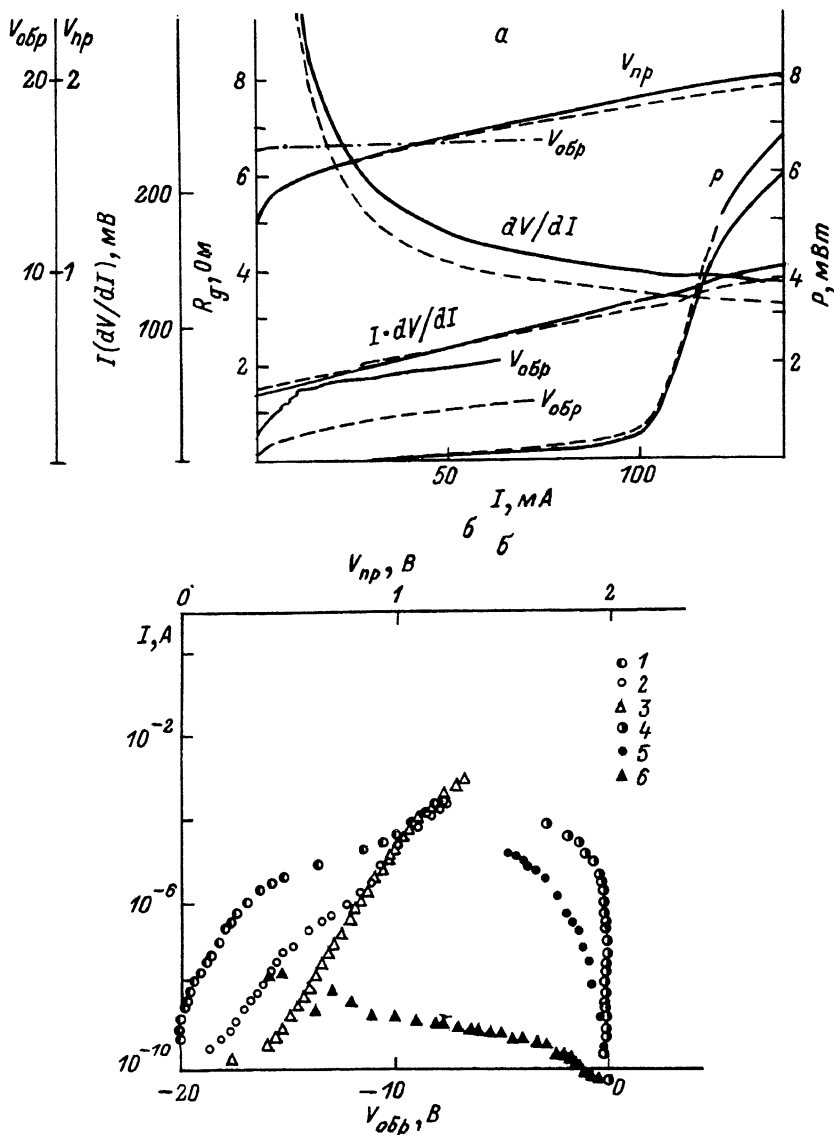


Рис. 2. Электрооптические характеристики СДГС № 2 до УЗО (сплошные линии), после Ш-ей дозы УЗО (штриховые линии) и после месячного хранения в темноте (штрих-пунктирные линии). Отсутствие штрих-пунктирной линии для некоторых характеристик означает, что они остались такими же, как и после Ш-ей дозы УЗО (а); прямые и обратные ветви ВАХ СДГС № 2 до УЗО (2.5), после УЗО (1.4) и после месячного хранения в темноте (3.6) (б).

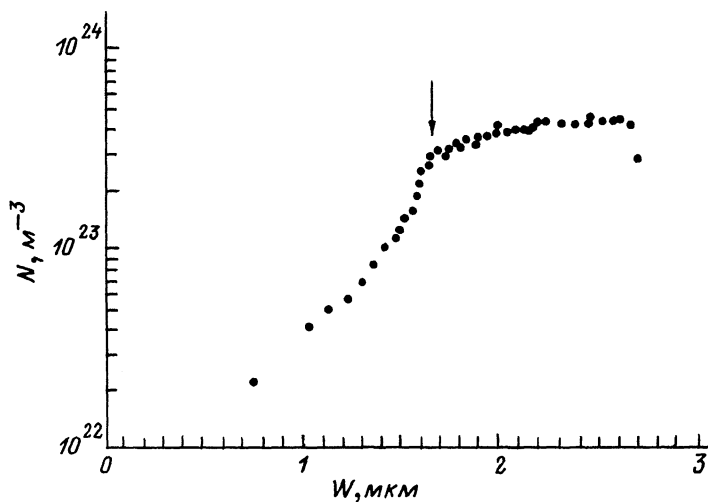


Рис. 3. Профиль распределения легирующей примеси в рР-области СДГС № 2 до УЗО (точки слева от стрелки) и после месячного хранения в темноте (все точки). Начало графика соответствует положению  $N_p$ -гетерограницы, причем эпитаксиальный  $N$ -слой расположен в области  $W < 0$ .

му, СДГС находилась в некотором неравновесном состоянии, из которого она в течение примерно месяца самопроизвольно возвращалась к состоянию равновесия. По достижении этого состояния резко улучшились обе ветви ВАХ, напряжение  $V_{проб}$  возросло до 16.5 В, а сам прибор приобрел форму идеальной лавины, на которой микроплазмы отсутствуют.

Отметим, что у некоторых СДГС после месячного хранения наблюдалась обратная картина – величина напряжения  $V_{проб}$  сильно уменьшалась или становилась равной нулю (см., например, СДГС №№ 6, 10 и 11 в таблице). С другой стороны, указанные изменения на ВАХ практически не отразились на поведении профиля легирующей примеси в области рР-гетерограницы. Этот факт, а также уменьшение  $R_d$  под действием УЗО, являются аргументами в пользу того, что УЗО влияет на  $N_p$ -гетерограницу. Несомненно и влияние УЗО на п- $CaA$ -подложку и/или  $NAB_{0.35}CaA_{0.65}As$ -эпитаксиальный слой, что отражается в изменении  $R_p$ .

Результаты настоящей работы показывают, что если тепловая обработка СДГС влияет в первую очередь на рР-гетерограницу [4, 5], то ультразвуковая – на  $N_p$ -гетерограницу, воздействуя на определенные типы дефектов, расположенные на или в ее окрестностях, улучшая при этом электрические и оптические характеристики

СДГС. В дальнейшем представляет интерес поиск и идентификация таких дефектов.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Здебский А.П., Остапенко С.С., Савчук А.У., Шейнкман М.К. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 20. С. 1243-1247.
- [2] Здебский А.П., Миронюк Н.В., Остапенко С.С. и др. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 10. С. 1861-1867.
- [3] Здебский А.П., Корчная В.Л., Торчинская Т.В., Шейнкман М.К. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 2. С. 76-81.
- [4] Krispin P., Beister G., Maeger J. // Sol. St. Electron. 1988. V. 31. N 5. P. 921-927.
- [5] Krispin P., Beister G., Maeger J. // Cryst. Prop. Prepar. 1987. V. 12. P. 181-194.
- [6] Пузин И.Б., Шейнкман М.К., Шерварлы Г.К. Тезисы XI-й Всес. конф. по физике полупроводников, Кишинев, 1988. Т. 2, С. 148-150.
- [7] Mejer N.J., Guldbransen T. // Proc. IEEE. 1963. V. 51. P. 1631-1637.
- [8] Пузин И.Б. // ПТЭ. 1983. № 4. С. 155-157.
- [9] Елисеев П.Г., Красильников А.И., Манько М.А., Страхов. В сб.: Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов. / Под ред. С.М. Рывкина, Ю.В. Шмарцева. Л.: Наука, 1969.

Институт полупроводников  
АН УССР

Поступило в Редакцию  
25 января 1989 г.

В окончательной редакции  
19 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 15                      12 августа 1989 г.

07

ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В  $Bi_{12}SiO_{20}$   
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ( $\lambda = 0.85$  мкм)

С.Л. Сочава, С.И. Степанов

К настоящему времени голографическая запись в кубических фоторефрактивных кристаллах типа  $Bi_{12}SiO_{20}$  (BSO) достаточно по-