

# Изменение активности рекомбинационных центров в кремниевых $p-n$ -структурах в условиях акустического нагружения

© О.Я. Олих<sup>¶</sup>

Киевский национальный университет им. Т. Шевченко (физический факультет),  
03127 Киев, Украина

(Получена 2 октября 2008 г. Принята к печати 20 ноября 2008 г.)

Используя метод дифференциальных коэффициентов вольт-амперных характеристик, исследованы глубокие уровни в  $Cz-Si$   $p-n$ -структурах в условиях ультразвукового нагружения (продольные волны частотой 4–26 МГц и интенсивностью до  $0.6 \text{ Вт/см}^2$ ). Выявлены уровни с термической энергией активации 0.44, 0.40, 0.37, 0.48 и 0.46 эВ. Предполагается, что эти уровни связаны с  $E$ -центром, бистабильным комплексом  $V_S O_{2i}$ , а также межузельными атомами, захваченными дислокационными петлями, соответственно. Установлено, что ультразвук индуцирует увеличение вклада в рекомбинационные процессы более мелких уровней и уменьшение энергии активации дефектов. Проанализирована возможность акустоиндуцированной обратимой перестройки конфигурации комплекса  $V_S O_{2i}$ .

PACS: 43.35.Ty, 71.55.Cn, 61.72.Ji

## 1. Введение

Методы неравновесной модификации дефектно-примесной подсистемы с целью получения новых качеств и свойств полупроводниковых кристаллов, структуры или прибора, методы так называемой „инженерии дефектов“ вызывают все больший интерес [1]. Это обусловлено перспективами создания с помощью таких методов элементной базы твердотельной электроники нового поколения за счет контролируемого формирования активных центров или нанокластеров. Безусловно, лидерами в этой области являются радиационные методы — см., например, [2,3]. Однако интересные результаты получены и при исследовании альтернативных способов влияния на дефектную структуру полупроводников, в частности при использовании для этих целей ультразвуковых (УЗ) волн [4–8]. Например, показано, что УЗ обработка стимулирует перегруппировку дефектов [4], распад [5] и образование [6] различных комплексов, формирование наночастиц [7] в объеме полупроводника, изменение концентрации дефектных центров на границе раздела окисел–полупроводник [8]. В то же время необходимо отметить, что строгая теория взаимодействия УЗ с дефектами, особенно для малодислокационных кристаллов, таких как кремний, отсутствует. В этой связи могут быть весьма полезными данные о влиянии акустических волн на электрическую активность дефектов.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния УЗ на энергетическое положение в запрещенной зоне и рекомбинационную активность электронных состояний, связанных с дефектами в кремниевых  $p-n$ -структурах. Следует отметить, что подавляющее большинство существующих работ в данной области посвящены изучению изменений свойств полупроводников в результате УЗ обработки,

т.е. необратимым, остаточным эффектам акустического влияния. Данная же работа описывает изменения, которые происходят в процессе распространения в кристалле УЗ волны и которые исчезают после прекращения действия упругих колебаний, т.е. объектом исследования являются обратимые, динамические эффекты.

## 2. Образцы и методика измерений

Образцы для исследований (площадью около  $1 \text{ см}^2$ ) вырезались из  $p-n$ -структуры (солнечного элемента) диаметром 100 мм, причем вырезались как из центральной части (в дальнейшем будем обозначать эти образцы SC1), так и из области вблизи края пластины (SC2). Подобный выбор вызван тем, что распределение дефектов по площади полупроводниковой пластины неоднородно, и, следовательно, можно было ожидать отличия влияния УЗ. Структура состояла из подложки  $Cz-p-Si$ , легированной бором ( $p = 1.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 300 мкм, на поверхности которой путем имплантации ионов фосфора создан слой с электронной проводимостью ( $n \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , толщина  $\sim 0.5 \text{ мкм}$ ). На поверхностях этого солнечного элемента были сформированы алюминиевые контакты: сплошной на  $p$ -области и полупрозрачный на  $n$ -области.

Параметры глубоких уровней определялись путем анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) согласно методике, предложенной в [9]. А именно количество максимумов на зависимости  $\partial\beta/\partial U = f(U)$  (где  $\beta$  — дифференциальный показатель наклона ВАХ,  $\beta = (qI/k_B T) \cdot (\partial I/\partial U)^{-1}$ ,  $q$  — элементарный заряд,  $I$  — ток, проходящий через  $p-n$ -структуру,  $U$  — напряжение прямого смещения,  $T$  — температура,  $k_B$  — постоянная Больцмана) соответствует количеству различных типов глубоких уровней (ГУ) в запрещенной зоне полупроводника, эффективно принимающих участие в

<sup>¶</sup> E-mail: olikh@univ.kiev.ua

**Таблица 1.** Сравнение полученных значений энергий активации глубоких уровней и литературных данных

Уровень	Полученные результаты				Литературные данные		
	$E_C - E_i^{**}$ , эВ				$E_C - E_i$ , эВ	Тип дефекта	Источник
	SC1		SC2				
без УЗ	при УЗН*	без УЗ	при УЗН*				
$E_1$	0.48	0.47	0.48	0.48	0.475	C–O–V <sub>2</sub>	[17]
$E_{11}$	–	–	0.46	0.46	0.44–0.48	$I$	[20]
$E_2$	0.44	0.425	0.43	0.42	0.43–0.44	V–P <sub>S</sub> (E-центр)	[11,12]
$E_3$	0.40	0.40	0.40	0.39	0.40	B <sub>S</sub> O <sub>2i</sub> <sup>sq</sup>	[13]
$E_4$	0.37	0.37	0.37	0.355	?	B <sub>S</sub> O <sub>2i</sub> <sup>st</sup>	
					0.37	$B_i$	[17]

*Примечание.* \* Параметры УЗН:  $f_{US} = 4.1$  МГц,  $W_{US} = 0.43$  Вт/см<sup>2</sup> (для SC1) и  $W_{US} = 0.60$  Вт/см<sup>2</sup> (для SC2). \*\* Случайная погрешность определения  $E_C - E_i$  составляет 0.01 эВ.

рекомбинации носителей заряда. При этом энергия термической активации ГУ  $E_C - E_i^i$  определяется абсциссой соответствующего максимума  $U_0^i$ :

$$E_C - E_i^i \approx (E_g - qU_0^i)/2, \quad (1)$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны,  $E_C$  — энергетическое положение дна зоны проводимости. Формула (1) справедлива с точностью до систематической ошибки  $\delta$ , зависящей от материала и соотношения коэффициентов захвата электронов и дырок  $c_n/c_p$  данного центра [9]; проведенные оценки показывают, что для Si при комнатной температуре и  $c_n/c_p = 10$   $\delta \approx 0.02$  эВ. Амплитуда каждого максимума определяется вкладом в рекомбинацию носителей того или иного центра [9]. Нами использовалась следующая процедура. Измеренная ВАХ корректировалась с учетом шунтирующего сопротивления  $R_{SH}$  [10] и на ее основе строилась зависимость  $\partial\beta/\partial U = f(U)$ , которая затем аппроксимировалась суммой гауссовых кривых, количество которых определялось числом максимумов. На основе найденных таким способом значений  $U_0^i$  с помощью формулы (1) рассчитывались значения  $E_C - E_i^i$  для каждого ГУ. При этом также оценивались относительные вклады каждого из максимумов  $\eta_i$  в суммарную площадь ( $\eta_i = S_i/S_\Sigma$ , где  $S_i$  — площадь под  $i$ -м максимумом,  $S_\Sigma$  — суммарная площадь под всей кривой). В дальнейшем значение  $\eta_i$  рассматривалось как показатель удельного вклада в общую рекомбинацию каждого из ГУ.

Образцы размещались в специальной камере, с помощью сменных пьезопреобразователей в них последовательно возбуждались продольные волны с частотой  $f_{US}$ , равной 4.1, 8.0, 13.6 и 26.1 МГц соответственно. Поскольку при интенсивности акустического нагружения  $W_{US} > 1$  Вт/см<sup>2</sup> в подсистеме дефектов кремния могут происходить уже необратимые изменения [5,6], в наших

экспериментах возбуждались волны с  $W_{US} < 0.6$  Вт/см<sup>2</sup> (что отвечало относительной деформации в звуковой волне  $\varepsilon_{US} = \sqrt{2W_{US}/\rho v_{US}^3} < 3 \cdot 10^{-6}$ , где  $\rho$  — плотность кремния,  $v_{US}$  — скорость звука). Отметим, что конструкция камеры обеспечивала как экранирование пьезопреобразователя, так и электрическую развязку процессов измерения ВАХ и возбуждения УЗ. Как следствие, предотвращалось проникновение в образец пьезоэлектрического поля и поэтому все нижеописанные эффекты могут определяться лишь знакопеременной деформацией. Эксперименты проводились при комнатной температуре; температура образца контролировалась при помощи медь-константановой дифференциальной термопары. Установлено, что при УЗ нагружении (УЗН) температура образца немного увеличивалась, однако нагрев не превышал 20 градусов при максимальных значениях  $W_{US}$ .

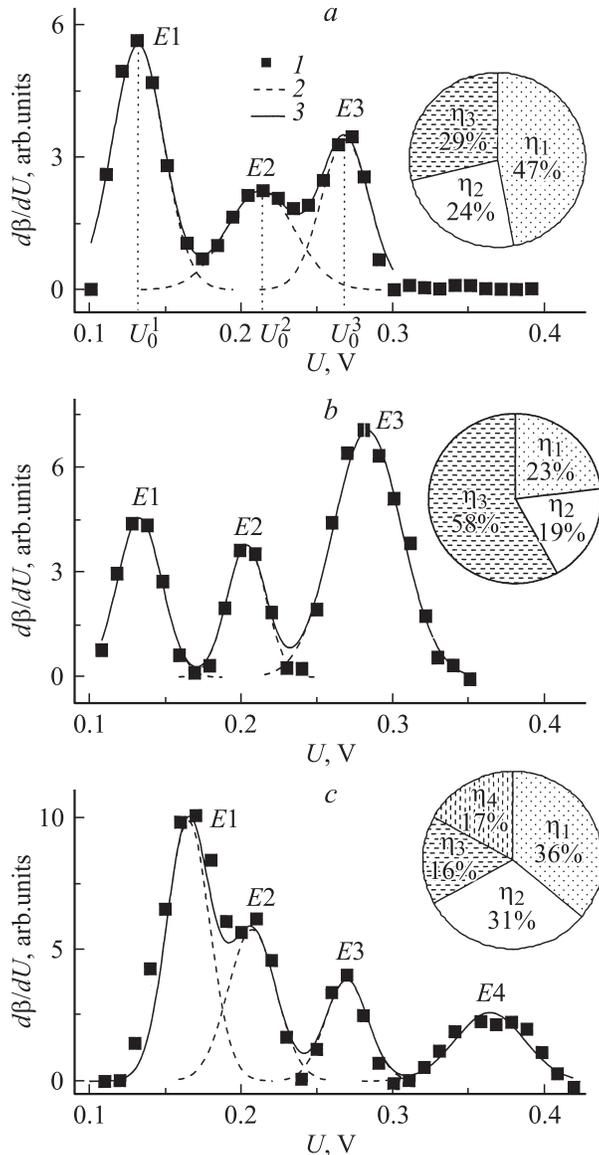
Измерения ВАХ проводились в условиях установившейся температуры последовательно: 1) до УЗ нагружения образца; 2) через 20–30 мин после включения УЗ; 3) через 20–30 мин после прекращения УЗН, причем в этом случае специально при помощи дополнительного разогрева поддерживалась температура образца, которую он имел во время УЗН. В первом и третьем случаях полученные результаты практически совпадали, что подтверждает именно обратимый характер акустоиндуцируемых явлений при различных значениях  $f_{US}$  и  $W_{US}$ .

### 3. Экспериментальные результаты

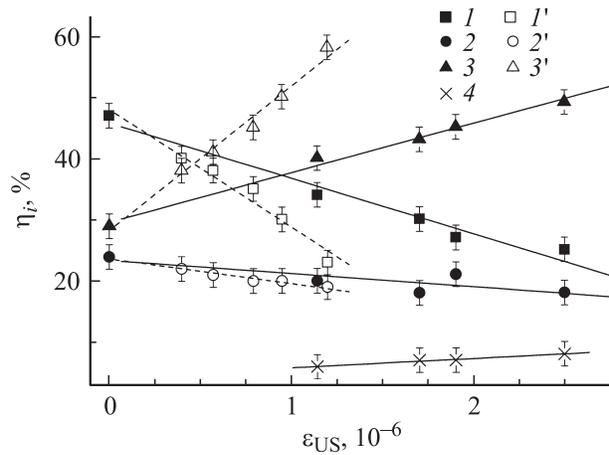
На рис. 1, *a* приведена исходная экспериментальная зависимость  $\partial\beta/\partial U$  для образца SC1. На ней наблюдаются три максимума, что согласно [9], свидетельствует о наличии трех типов уровней, определяющих генерационно-рекомбинационные процессы при прохождении тока.

Эти уровни в дальнейшем будем обозначать  $E1$ ,  $E2$  и  $E3$ . Абсциссы максимумов  $U_0^1$ ,  $U_0^2$ ,  $U_0^3$  равны соответственно 0.14, 0.21 и 0.28. Расчеты по формуле (1) показали, что  $E_C - E_t$  для уровней  $E1$ ,  $E2$  и  $E3$  составляют величины 0.48, 0.44 и 0.40 соответственно (см. табл. 1). Из приведенной на рис. 1, *a* диаграммы видно, что при отсутствии УЗ максимальный вклад в рекомбинацию вносит наиболее глубокий уровень.

В процессе УЗН картина максимумов меняется (см. рис. 1, *b* и *c*). А именно меняются соотношения площадей максимумов (вклады в рекомбинацию различных



**Рис. 1.** Зависимость производной дифференциального показателя наклона ВАХ. Образец SC1: *a* — без УЗ нгатурения; *b* — при УЗН ( $f_{US} = 26.1$  МГц,  $W_{US} = 0.10$  Вт/см<sup>2</sup>); *c* — при УЗН (4.1 МГц, 0.25 Вт/см<sup>2</sup>). 1 — точки, полученные после дифференцирования экспериментальных ВАХ, 2 — гауссовы кривые, которыми аппроксимировались максимумы, 3 — сумма всех гауссианов. Справа возле кривых приведены диаграммы относительных вкладов  $\eta_i$  каждого из максимумов.



**Рис. 2.** Зависимость удельных вкладов в общую рекомбинацию отдельных уровней  $E1$  (кривые 1 и 1'),  $E2$  (2 и 2'),  $E3$  (3 и 3') и  $E4$  (4) от величины относительной колебательной деформации при УЗН с  $f_{US} = 4.1$  МГц (кривые 1–4) и  $f_{US} = 26.1$  МГц (1'–3'). Точки получены после анализа экспериментальных ВАХ, линии — их линейная аппроксимация.

ГУ), происходит сдвиг положения максимумов (изменение энергии активации ГУ), изменяется количество максимумов (проявляются новые ГУ). Обобщая полученные данные можно сделать следующие выводы. 1) С увеличением  $W_{US}$  возрастает роль в рекомбинационных процессах уровней, расположенных ближе к дну зоны проводимости, причем зависимости показателей удельного вклада уровней от относительной деформации очень близки к линейным ( $\eta_i \propto \epsilon_{US}$ ) (см. рис. 2). Кроме того, такие акустоиндуцированные изменения происходят более эффективно с повышением частоты УЗ. 2) При превышении порогового значения  $W_{US} \approx 0.10$  Вт/см<sup>2</sup> (независимо от частоты) появляется сигнал от еще одного ГУ, обозначенного нами  $E4$ , для которого  $E_C - E_t = 0.37$  эВ. Это наиболее мелкий из наблюдаемых нами уровней и его вклад в рекомбинацию также возрастает с увеличением  $W_{US}$ . 3) При  $W_{US} > 0.3$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается незначительный сдвиг положения уровней  $E1$  и  $E2$  ближе к дну зоны проводимости на 0.010–0.015 эВ (см. табл. 1).

Результаты, полученные для образцов SC2, приведены на рис. 3 и в табл. 2. Видно, что в этом случае картина более сложная, чем для SC1: даже без УЗН присутствует максимум  $E4$  и, кроме того, наблюдается еще один максимум, обозначенный как  $E11$ , который связан с уровнем  $E_C - E_t = 0.46$  эВ. В целом же характер акустоиндуцированных изменений в SC2 напоминает наблюдаемый в SC1, а именно имеет место увеличение удельного вклада в рекомбинацию уровней, расположенных ближе к  $E_C$ , эффект возрастает с ростом  $f_{US}$ , при УЗН достаточной интенсивности наблюдается уменьшение энергии активации ГУ  $E2$ ,  $E3$ ,  $E4$  на 0.010–0.015 эВ (см. табл. 1). Однако эффективность УЗН несколько слабее по сравнению с SC1.

**Таблица 2.** Относительный вклад глубоких уровней в рекомбинационные процессы для SC2 при различных режимах ультразвукового нагружения

$f_{US}$ , МГц	$\varepsilon_{US}$ , $10^{-6}$	$\eta_1$ , %	$\eta_{11}$ , %	$\eta_1 + \eta_{11}$ , %	$\eta_2$ , %	$\eta_3$ , %	$\eta_4$ , %	$\eta_3 + \eta_4$ , %
—	—	26	36	62	19	16	3	19
4.1	1.6	19	43	62	14	18	6	24
	2.1	17	40	57	19	17	7	24
	2.5	13	42	55	22	15	8	23
	3.0	15	37	52	23	13	12	25
13.6	0.5	18	36	54	18	20	8	28
	1.0	10	37	47	19	26	8	32
	1.5	4	44	48	19	26	7	33

Примечание. Точность определения энергии относительного вклада в рекомбинацию составляет 2%.

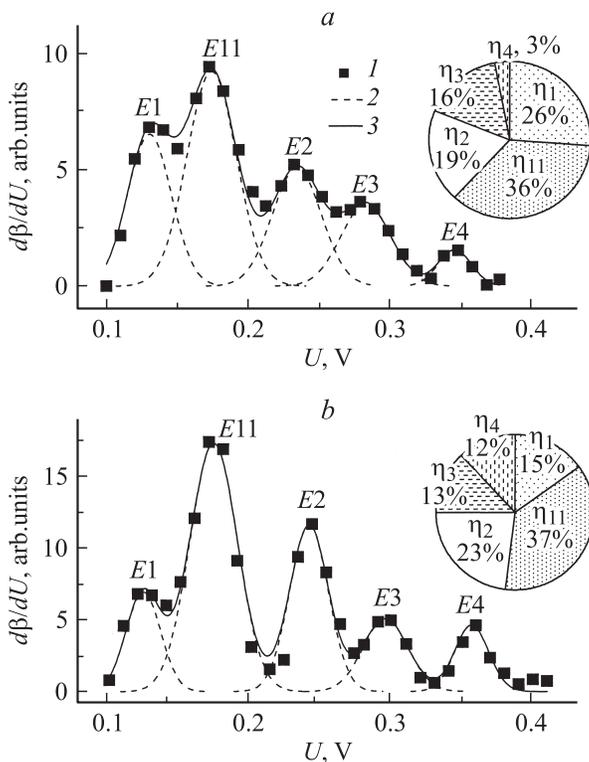
#### 4. Обсуждение полученных результатов

Исходя из полученных значений  $E_C - E_t$  и основываясь на известных литературных данных, сопоставим уровням  $E1-E4$  конкретные дефекты. По-видимому, уровню  $E2$  соответствует  $E$ -центр (пара вакансия-фосфор), для которого  $E_C - E_t = 0.43-0.44$  эВ [11,12]. Действительно, в исследуемых образцах именно фосфор является легирующей примесью в  $n$ -слое; известно так-

же, что данный центр эффективно влияет на процессы рекомбинации [11].

Что касается уровня  $E3$ , то он, по нашему мнению, отвечает комплексу  $V_S O_{2i}$  — дефекту, состоящему из узлового бора и димера. Действительно, 1) положение уровня соответствующего  $V_S O_{2i}$ ,  $E_C - E_t = 0.40-0.41$  эВ [13,14], что совпадает с полученными данными для  $E3$ ; 2)  $V_S O_{2i}$  относится к основным рекомбинационным центрам в  $Cz-Si:B$  [13], который является материалом подложки исследуемых структур; 3) концентрация  $V_S O_{2i}$  увеличивается при освещении или инжекции неосновных носителей заряда за счет увеличения подвижности комплекса  $O_i-O_i$  и последующего его захвата ионом бора [13]; в нашем случае при монохроматическом освещении с длиной волны 900 нм наблюдается увеличение вклада в рекомбинацию центра  $E3$  ( $\eta_3$  изменяется с 25 до 29% для SC1 и с 7 до 16% для SC2), что свидетельствует об увеличении концентрации соответствующих дефектов.

Очень важным и положительным фактором для проявления акустодинамических эффектов в полупроводниках является метастабильность дефектов [15]. Именно зарядозависимая конфигурационная бистабильность характерна для  $V_S O_{2i}$  [13,16]: дефект может пребывать или в конфигурации  $V_S O_{2i}^{sq}$  (более вероятной для однократно позитивно заряженного состояния) или в  $V_S O_{2i}^{st}$  (более вероятной в нейтральном состоянии). Уровень  $E_C - 0.40$  эВ относится к  $V_S O_{2i}^{sq}$  [13]. По нашему мнению, интенсификация процесса перезарядки комплекса  $V_S O_{2i}$  под действием ультразвука и проявляется в увеличении вклада уровня  $E3$  в рекомбинационных процессах, а также приводит к переходу  $V_S O_{2i}^{sq} \rightarrow V_S O_{2i}^{st}$  части дефектов. Поскольку такой переход сопряжен с преодолением потенциального барьера [16], он становится эффективным только после превышения  $W_{US}$  порогового значения. В этой связи отметим, что один из компонентов комплекса  $V_S O_{2i}$ , а именно димер, в результате перезарядки перестраивается таким же образом  $O_{2i}^{sq} \rightarrow O_{2i}^{st}$  [13,16] (происходит диффузия по механизму Бургуэна). Мы предполагаем, что появление максиму-



**Рис. 3.** То же, что на рис. 1. Образец SC2:  $a$  — без УЗН;  $b$  — при УЗН (4.1 МГц, 0.60 Вт/см<sup>2</sup>).

ма  $E4$  при акустоиндуцируемом переходе  $V_S O_{2i}^{sq} \rightarrow V_S O_{2i}^{st}$  свидетельствует о том, что обнаруженные уровни  $E3$  и  $E4$  относятся к одному и тому же дефекту  $V_S O_{2i}$ , только пребывающему в разных конфигурациях. В этой связи мы рассматриваем сумму  $\eta_3 + \eta_4$  (см. табл. 2), полагая уровни  $E3$  и  $E4$  как два состояния  $V_S O_{2i}$ . Отсюда следует вывод об увеличении в целом вклада в рекомбинацию комплекса  $V_S O_{2i}$  при воздействии упругих колебаний.

Переход дефектов в нестабильное состояние при воздействии УЗ наблюдался и ранее [6,15], полученные нами результаты показывают, что эффект возрастает с увеличением частоты акустических волн.

С другой стороны, из литературы [17] известно, что состояние  $E_C - E_i = 0.37$  эВ может соответствовать акцепторному уровню межузельного атома бора  $V_i$ . В связи с этим может быть предложен и другой механизм акустоиндуцированного появления уровня  $E4$ : при УЗН происходит освобождение собственных межузельных атомов  $I$ , захваченных дислокационными петлями вблизи  $p$ - $n$ -границы (значительное количество  $I$ -дефектов и дислокаций легко объясняется ионной имплантацией, использованной для изготовления структуры), затем происходит диффузия  $I$  в глубь  $p$ -области, где они вытесняют атомы  $V$  из узлов решетки по механизму Воткинса. Однако, 1) при таком подходе достаточно тяжело объяснить исчезновение сигнала, связанного с  $E4$  после УЗН; 2)  $V_i$  является центром с отрицательной корреляционной энергией, его донорный уровень  $E_C - E_i = 0.13$  эВ [17] находится ближе к  $E_C$ , поэтому вероятность наблюдения акцепторного уровня в  $p$ -Si очень мала. Как следствие, данный механизм кажется маловероятным.

Обратимся теперь к уровню  $E1$ . Его энергия активации  $0.48$  эВ очень близка к положению уровня комплекса  $C-O-V_2 - E_C - E_i = 0.47$  эВ [18]. Однако этот центр наблюдался в  $n$ -Si, облученном или электронами, или  $\gamma$ -квантами [18], и мы считаем, что его появление в исследованных структурах мало вероятно. По нашему мнению,  $E1$  связан межузельными атомами (собственными или примесными), захваченными на дислокации, — именно такие дефекты являются эффективными рекомбинационными центрами [19]. Например, в работе [20] предполагается, что дефекту  $I$  отвечает уровень  $E_C - E_i = 0.44-0.48$  эВ. Хотя в целом энергетическое положение уровней захваченных дефектов может отличаться от значений в объеме [19]. Определенные основания для таких сопоставлений появляются при рассмотрении результатов, полученных на SC2. Известно, что на периферийных участках полупроводниковых пластин концентрация дефектов выше, чем на центральных. В нашем случае об этом косвенно свидетельствует значительное уменьшение шунтирующего сопротивления в SC2 ( $\sim 2 \cdot 10^3$  Ом) по сравнению с SC1 ( $\sim 2 \cdot 10^4$  Ом). Действительно, уменьшение  $R_{SH}$  обычно связывают с наличием структурных дефектов на границе между  $p$ - и  $n$ -областями, возрастанием концентрации

примеси, токовыми процессами по границам зерен и дислокациям [10,21]. Существенно более высокая концентрация примесей в SC2, захваченных на дислокационные петли, возможно, и приводит к тому, что в диапазоне  $E_C - (0.46-0.48)$  эВ наблюдаются два уровня ( $E1$  и  $E11$ ), вклад которых в рекомбинацию существенно выше, чем в SC1 (см. рис. 1 и 3). Возможно,  $E1$  и  $E11$  отвечают одному и тому же дефекту в различных конфигурациях, одна из которых искажена из-за близкого расположения дислокационной петли. Следовательно, их вклад в рекомбинационные процессы также можно рассматривать суммарно ( $\eta_1 + \eta_{11}$ , см. табл. 2). Кроме того, под действием УЗ, возможно, происходит перестройка  $E1 \rightarrow E11$ , эффективность которой возрастает с увеличением  $f_{US}$  (рис. 3, табл. 1, соотношение между  $\eta_1$  и  $\eta_{11}$ ).

Более высоким содержанием примесей может быть объяснено и проявление  $E4$  в акустически невозможном образце SC2: исходная высокая концентрация  $V_S O_{2i}$  позволяет обнаружить уровень  $E4$ , при этом сохраняется соотношение концентраций  $V_S O_{2i}^{st}$  и  $V_S O_{2i}^{sq}$  как в SC1. Меньшая эффективность акустоиндуцированного увеличения вклада в рекомбинационные процессы более мелких уровней для SC2 по сравнению с SC1 может определяться большим поглощением УЗ на дефектах в области  $p$ - $n$ -перехода. В результате чего значительная часть вводимой энергии затрачивается на процессы типа  $E1 \rightarrow E11$ , в то время как в  $p$ -область проникают акустические колебания с меньшей интенсивностью.

Отметим также, что уменьшение энергии активации ГУ на  $0.010-0.015$  эВ при УЗН достаточной интенсивности не может быть объяснено акустоиндуцируемым нагревом образца на  $\leq 20$  К, поскольку характерная величина температурных коэффициентов изменения положения уровней примесных центров в запрещенной зоне  $\sim 10^{-4}$  эВ/К. Этот результат свидетельствует о модификации электронной структуры комплексов  $P_S - V$ ,  $V_S O_{2i}$  за счет взаимодействия с неравновесными фононами, возбужденными ультразвуком.

Таким образом, приведенные в данной работе результаты подтверждают практическую перспективность динамического акустического управления свойствами полупроводников и характеристиками приборов на их основе. Причем необходимо отметить, что возникающее при появлении неравновесных носителей заряда неравновесное состояние дефектов (в нашем случае рекомбинационных центров) служит важным фактором повышения эффективности акустодефектного взаимодействия в целом. Именно в этой ситуации дополнительная колебательная деформация внешнего УЗ становится более эффективным средством управления характеристиками прибора в целом. Безусловно, вопросы физического механизма акустоиндуцированных преобразований структуры, конфигурации, зарядового состояния дефектов в полупроводниках требуют дальнейших исследований.

## 5. Заключение

В данной работе впервые в динамическом режиме исследовано поведение глубоких уровней в кремниевых  $p-n$ -структурах при УЗН. Обнаружено, что с увеличением амплитуды УЗ увеличивается вклад в рекомбинационные процессы более мелких уровней, причем этот процесс практически линейно зависит от относительной деформации в упругой волне. Также наблюдается уменьшение энергии термической активации дефектов, причем эффективность таких процессов возрастает при увеличении частоты акустических колебаний. Качественное объяснение полученных результатов проведено в рамках модели акустоиндуцированной перестройки примесных дефектных комплексов.

Автор выражает благодарность за предоставленные для измерений образцы В.П. Костылёву (ИФП НАН Украины).

Работа выполнена при поддержке фонда УНТЦ (проект № 3555).

## Список литературы

- [1] Л.С. Смирнов. ФТП, **35** (9), 1029 (2001).
- [2] В.В. Козловский, В.А. Козлов, В.Н. Ломасов. ФТП, **34** (2), 129 (2000).
- [3] А.Р. Челядинский, Ф.Ф. Комаров. УФН, **173** (8), 813 (2003).
- [4] Е.М. Зобов, М.Е. Зобов, Ф.С. Габиров, И.К. Камилов, Ф.И. Маняхин, Е.К. Наими. ФТП, **42** (3), 282 (2008).
- [5] А.А. Подолян, В.И. Хиврич. Письма ЖТФ, **31** (10), 11 (2005).
- [6] Я.М. Олих, Н.Д. Тимочко, А.П. Долголенко. Письма ЖТФ, **32** (13), 67 (2006).
- [7] A. Romanuk, V. Spassov, V. Melnik. J. Appl. Phys., **99**, 034 314 (2006).
- [8] П.Б. Парчинский, С.И. Власов, Л.Г. Лигай. ФТП, **40** (7), 829 (2006).
- [9] С.В. Булярский, М.О. Воробьев, Н.С. Грушко, А.В. Лакалин. Письма ЖТФ, **25** (5), 22 (1999).
- [10] В.В. Сердюк. *Физика солнечных элементов* (Одесса, Логос, 1994).
- [11] P.V. Kuchinskii, V.M. Lomako. Sol. St. Electron., **29** (10), 1041 (1986).
- [12] S.Zh. Karazhanov. Semicond. Sci. Technol., **16** (4), 276 (2001).
- [13] J. Schmidt, K. Bothe, D. Macdonald, J. Adey, R. Jones, D.W. Palmer. J. Mater. Res., **21** (1), 5 (2006).
- [14] S. Rein, S.W. Glunz. Appl. Phys. Lett., **82** (7), 1054 (2003).
- [15] О.Я. Олих, И.В. Островский. ФТТ, **44** (7), 1198 (2002).
- [16] J. Adey, R. Jones, D.W. Palmer, P.R. Briddon, S. Oberg. Phys. Rev. Lett., **93** (5), 055 504 (2004).
- [17] R.D. Harris, J.L. Newton, G.D. Watkins. Phys. Rev. B, **36** (2), 1094 (1987).
- [18] П.Ф. Лугаков, В.Д. Ткачев, В.В. Шуша. ФТП, **13** (5), 875 (1979).
- [19] V. Kveder, M. Kittler, W. Schroter. Phys. Rev. B, **63** (11), 115 208 (2001).

[20] В.В. Лукьяница. ФТП, **37** (4), 422 (2003).

[21] В.И. Гаман. *Физика полупроводниковых приборов* (Томск, НЛТ, 2000).

Редактор Л.В. Беляков

## Changing of the recombination centers activity in silicon $p-n$ -structures under acoustic loading

O.Ya. Olikh

Taras Shevchenko Kiev National University,  
Physics Faculty,  
03127 Kiev, Ukraine

**Abstract** The deep levels in  $Cz-Si$   $p-n$ -structures are investigated using the method of the current-voltage characteristic differential coefficients under ultrasonic loading condition (longitudinal waves with frequency 4–26 MHz and intensity up to 0.6 W/cm<sup>2</sup>). There levels with activation thermal energy 0.44, 0.40, 0.37, 0.48 and 0.46 eV were detected. It is suggested that this levels related to the  $E$ -centre, the bistable complex  $B_5O_{2i}$  and interstitial atoms captured on dislocation loops respectively. It is revealed that ultrasound induces both increase of the shallow levels contribution into recombination processes and reduction of the defects activation energy. The possibility of the acoustoinduced reversible changes of the  $B_5O_{2i}$  configuration is analyzed.