

05;06,09,12

## Влияние сверхвысокочастотной обработки на электрофизические характеристики технически важных полупроводников и поверхностно-барьерных структур

© А.А. Беляев<sup>1</sup>, А.Е. Беляев<sup>1</sup>, И.Б. Ермолович<sup>1</sup>, С.М. Комирченко<sup>1</sup>, Р.В. Конакова<sup>1</sup>, В.Г. Ляпин<sup>1</sup>,  
В.В. Миленин<sup>1</sup>, Е.А. Соловьев<sup>1</sup>, М.В. Шевелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников НАН Украины,  
252650 Киев, Украина

<sup>2</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,  
252005 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 2 сентября 1997 г.)

Исследован эффект стимулированного сверхвысокочастотным электромагнитным излучением изменения электрофизических параметров узкозонных ( $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0.22-0.24$ ) и широкозонных (арсенид галлия, фосфиды индия и галлия) полупроводниковых материалов и диодных структур с барьером Шоттки на их основе. Показано, что улучшение параметров материалов и приборных структур обусловлено геттерированием дефектов. Рассмотрены возможные механизмы взаимодействия СВЧ излучения с исследованными объектами.

### Введение

Условия эксплуатации полупроводниковой элементной базы предусматривают определенный уровень ее устойчивости к различного рода лучевым воздействиям, в том числе к ионизирующей радиации и электромагнитному излучению [1]. Начиная с 50-х годов и до настоящего времени влиянию ионизирующей радиации на полупроводниковые материалы и приборы было посвящено огромное количество теоретических и экспериментальных работ. В противоположность этому воздействие электромагнитного излучения, особенно сверхвысокочастотного (СВЧ), освещено не так широко. В то же время известно, что СВЧ излучение, воздействуя на приборные структуры и готовые изделия (диоды, транзисторы, интегральные схемы), приводит в ряде случаев к их катастрофическим отказам [2]. С другой стороны, в последнее время появились сообщения, в которых указывается на стимулированные СВЧ излучением эффекты геттерирования дефектов и структурной релаксации в полупроводниковых материалах [3,4].

Целью данной работы является исследование влияния СВЧ излучения на электрофизические характеристики узкозонных ( $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ) и широкозонных (арсенид галлия, фосфиды индия и галлия) массивных полупроводниковых материалов и поверхностно-барьерных структур на их основе.

### Образцы и методы исследований

Объектами исследования были: 1) монокристаллические пластины  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0.21-0.24$ ), арсенида галлия, фосфидов индия и галлия с концентрацией свободных электронов  $\sim 10^{16}-2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ; 2) приборные структуры с барьером Шоттки, сформированные в вакууме  $10^{-4}$  Па конденсацией хрома на поверхностях (100)

арсенида галлия и фосфидов индия и галлия, а также конденсацией молибдена, вольфрама, пластины, алюминия,  $\text{Au-Ti}$  и нитрида титана на поверхности (100) арсенида галлия. Толщина слоя металла составляла 80–100 nm.

Образцы подвергались облучению в магнетроне в сантиметровом диапазоне длин волн (режим облучения в свободном пространстве) [5]. Время экспозиции изменялось в интервале 1–60 s для различных образцов. Выходная мощность генератора составляла 5 kW. Интенсивность микроволнового воздействия варьировалась изменением расстояния между облучаемым объектом и выходом волновода либо изменением времени экспозиции при неизменном расстоянии до облучаемого объекта. До и после облучения на массивных образцах при температуре  $T = 77 \text{ K}$  измерялись фотолюминесценция (ФЛ) в спектральном интервале 0.6–2.0 eV при возбуждении светом мощной лампы накаливания ПЖ-100 с  $h\nu > 2.0 \text{ eV}$ , эффект Холла, время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p$ . На поверхностно-барьерных структурах измерялись вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики, диффузионная длина неосновных носителей заряда  $L_p$ . Оже-электронные спектры и профили распределения компонентов в контакте металл-полупроводник.

### Результаты измерений и обсуждение

Как показывают проведенные эксперименты, результаты СВЧ облучения кристаллов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  сильно зависят от исходного состояния образцов. Так, наличие в исходном образце 1 (табл. 1) неоднородностей, способных приводить к аномалиям на температурной зависимости постоянной Холла  $R_x(T)$  (рис. 1), после обработки проявляется в виде конверсии типа проводимости и резкого изменения времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p$  (рис. 2). В то же время для достаточно

**Таблица 1.** Влияние СВЧ облучения на электрофизические параметры (фактор идеальности,  $n$ , подвижность  $\mu_p$  и время жизни  $\tau_p$  неосновных носителей заряда, энергию залегания  $E_t$  и концентрацию  $N_t$  примесных центров)  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  при  $T = 77\text{ K}$

№ образца	Состав $x$	Вид обработки	$n, \text{cm}^{-3}$	$\mu_p, \text{cm}^2/\text{Vs}$	$\tau_p, \mu\text{s}$	$E_t, \text{eV}$	$N_t, \text{cm}^{-3}$
1	0.24	Исходный	$6.9 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^4$	0.61		
		СВЧ	$2.54 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^3$	0.246		
2	0.21	Исходный	$5.12 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^5$	1.4	0.1	$1.1 \cdot 10^{14}$
		СВЧ	$4.9 \cdot 10^{14}$	$1.5 \cdot 10^5$	2.4	0.1	$3.6 \cdot 10^{13}$
3	0.22	Исходный	$4.82 \cdot 10^{14}$	$1.4 \cdot 10^5$	2.1	0.07	$6.25 \cdot 10^{13}$
		СВЧ	$4.6 \cdot 10^{14}$	$9.6 \cdot 10^4$	3.0	0.07	$2.5 \cdot 10^{13}$

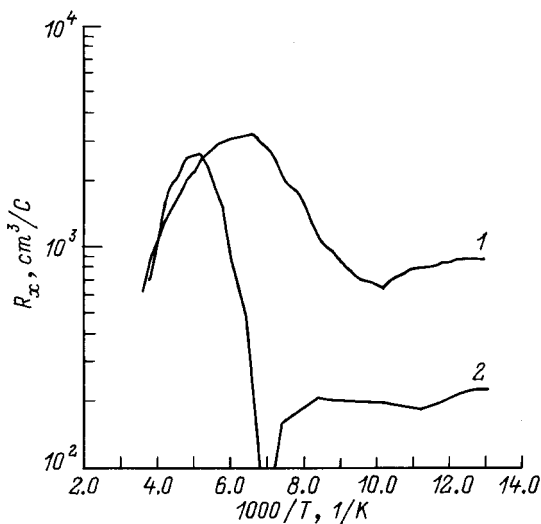
однородных образцов характер изменений качественно иной. СВЧ обработка таких образцов (образцы 2 и 3 в табл. 1) приводит к заметному увеличению  $\tau_p$ . При этом наблюдаются слабое увеличение  $R_x$  в области примесной проводимости и некоторое уменьшение подвижности  $\mu_p$ . Данные, полученные из температурных зависимостей  $\tau_p$  в этом случае, свидетельствуют об уменьшении концентрации рекомбинационно-активных центров, имеющих энергетические уровни в верхней половине запрещенной зоны.

Для того чтобы представить себе возможный механизм влияния СВЧ обработки на дефектную структуру исследуемых кристаллов, обратимся к неоднородному разогреву образца за счет поглощения СВЧ энергии. Другими словами, мы полагаем, что основным механизмом диссипации энергии поглощенного СВЧ излучения является разогрев, стимулирующий перемещение дефектов на стоки. В качестве последних могут выступать дислокации, малоугловые границы, крупные кластеры точечных дефектов. Этот процесс обуславливает некоторое повышение  $\tau_p$  и  $R_x$  (см. образцы 2 и 3 в табл. 1). С другой стороны, в изначально неоднородных образцах

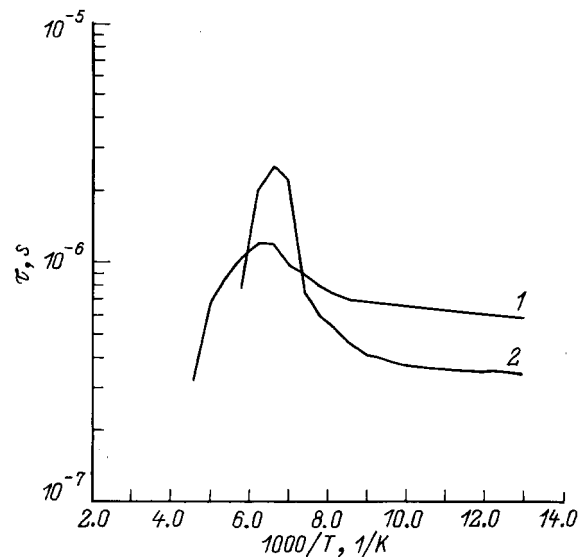
(образец 1 в табл. 1), содержащих дополнительные каналы проводимости, СВЧ обработка приводит к усилению примесных атмосфер дефектов, ответственных за эти каналы. Они становятся достаточно мощными, чтобы резко изменить тип проводимости и время жизни неосновных носителей заряда.

Таким образом, описанные результаты указывают на существенную роль преобразований точечно-дефектной структуры кристаллов, которые могут стимулироваться нагревом при СВЧ облучении и диффузией рекомбинационно-активных точечных дефектов и примесей на стоки.

О значительном влиянии СВЧ облучения на спектр точечных дефектов в кристаллах свидетельствуют и данные по изучению спектров ФЛ арсенида галлия и фосфидов индия и галлия. Например, в исходных спектрах ФЛ арсенида галлия, легированного оловом (рис. 3), наблюдаются две перекрывающиеся полосы с максимумами при  $h\nu_{\text{max}} = 1.15\text{--}1.20$  и  $0.993\text{--}1.01\text{ eV}$ . В результате облучения длительностью  $t = 6\text{ s}$  во всех исследованных образцах положение максимумов становится одинаковым ( $1.185$  и  $1.01\text{ eV}$ ) при преимущественном усилении



**Рис. 1.** Температурная зависимость постоянной Холла образцов  $\text{Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$ : 1 — исходный, 2 — после СВЧ облучения в течение 5 с.



**Рис. 2.** Температурная зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в образцах  $\text{Cd}_{0.21}\text{Hg}_{0.79}\text{Te}$ . (1, 2 — то же, что и на рис. 1).

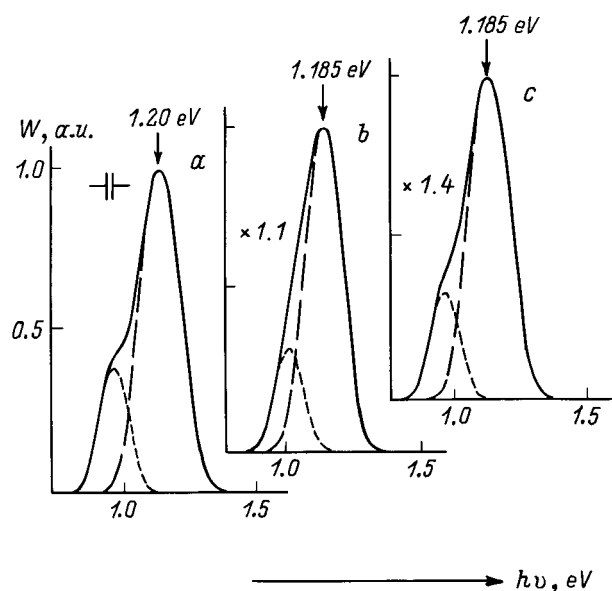
**Таблица 2.** Влияние сверхвысокочастотного электромагнитного облучения на электрофизические параметры диодов Шоттки

Тип структуры	Тип обработки	Высота барьера $\varphi_B$ , eV	Фактор идеальности $n$	Диффузионная длина неосновных носителей заряда $L_p'$ , $\mu\text{m}$
Cr–GaAs	Исходные	0.73–0.75	1.17–1.24	1.2–1.4
	СВЧ	0.76–0.77	1.08–1.09	1.5–1.7
Mo–GaAs	Исходные	0.68–0.69	1.16–1.23	2.3–2.8
	СВЧ	0.68–0.69	1.09–1.14	2.5–2.7
W–GaAs	Исходные	0.65–0.66	1.20–1.40	1.7–2.0
	СВЧ	0.69–0.70	1.09–1.12	2.1–2.2
Pt–GaAs	Исходные	0.88–0.95	1.12–1.37	2.1–2.2
	СВЧ	0.88–0.89	1.18–1.24	2.1–2.2
Al–GaAs	Исходные	0.55–0.58	1.68–2.20	1.6–1.9
	СВЧ	0.57–0.58	1.30–1.40	2.0
Au–Ti–GaAs	Исходные	0.70–0.76	1.3–1.4	1.7–1.8
	СВЧ	0.70–0.76	1.32–1.33	1.85–1.92
TiN–GaAs	Исходные	0.70–0.75	1.24–1.35	1.60–1.75
	СВЧ	0.70–0.75	1.08–1.10	1.80–1.82
Cr–InP	Исходные	0.67–0.69	1.50–1.80	1.52–1.60
	СВЧ	0.63–0.65	1.20–1.40	1.70–1.75
Ga–GaP	Исходные	1.63–1.67	1.50–1.72	0.53
	СВЧ	1.85–1.88	1.32–1.40	0.87

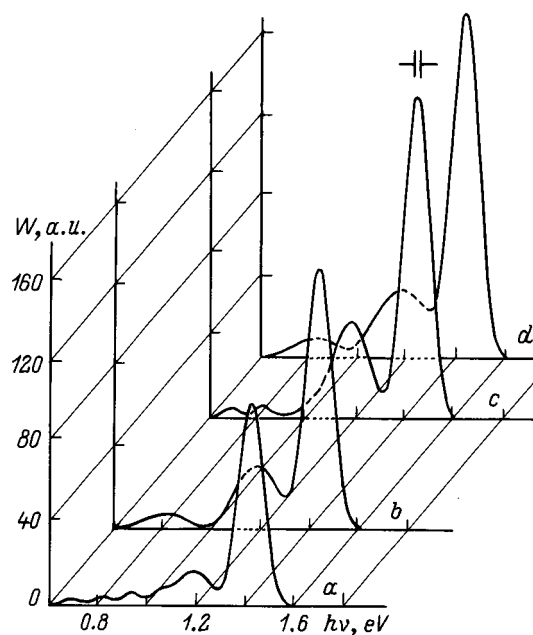
полосы 1.185 eV. Полосы сужаются, что свидетельствует о структурно-примесном упорядочении приповерхностного слоя арсенида галлия. При  $t \geq 60$  s наблюдается уменьшение интенсивности обеих полос и их уширение, свидетельствующие об усилении деградиационных процессов в арсениде галлия. Аналогичные изменения полос 1.410, 1.150 и 0.820 eV при воздействии СВЧ излучения

в течение 1–40 s наблюдаются и в монокристаллах фосфида индия (100) (рис. 4).

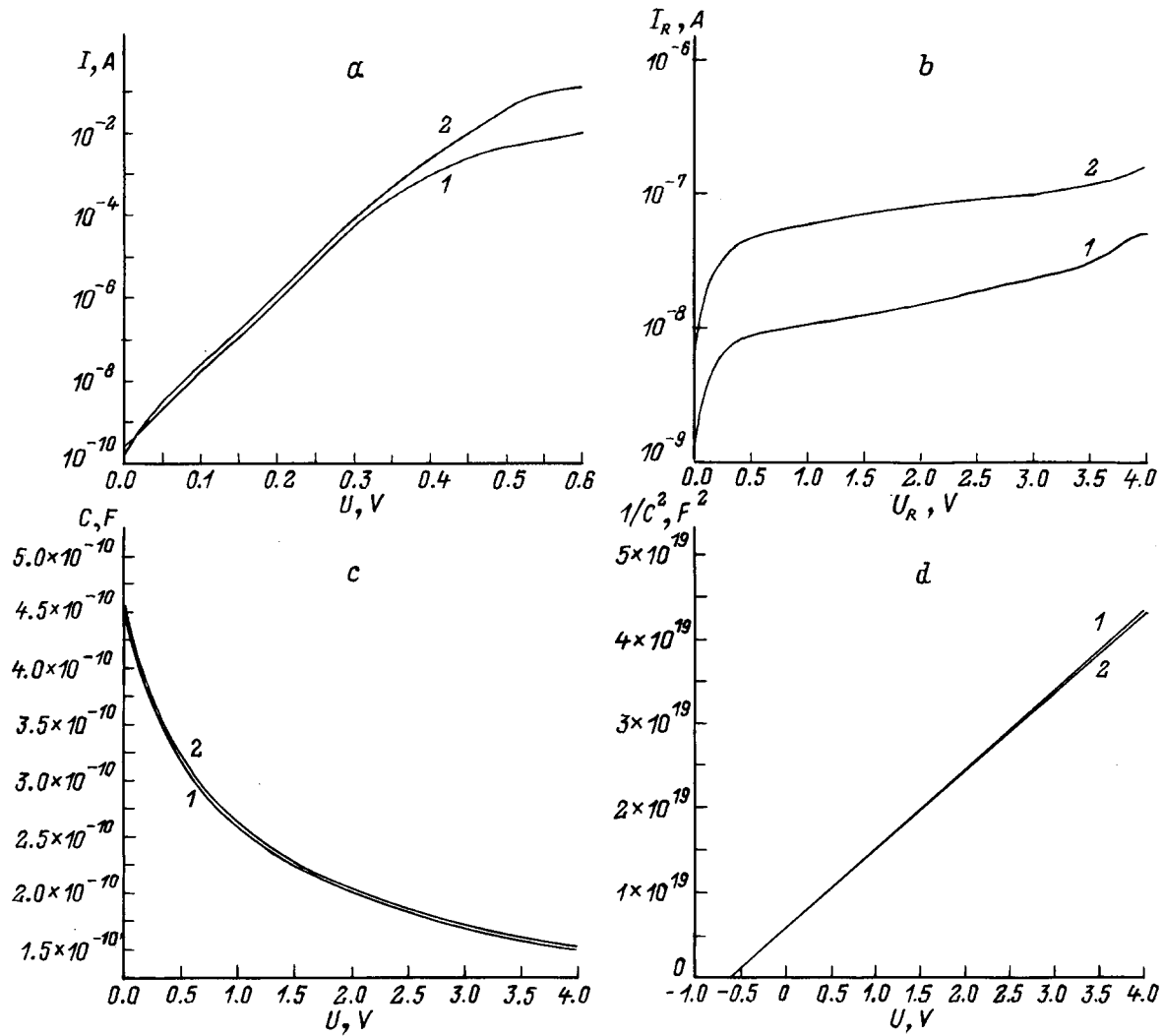
В более дефектных кристаллах арсенида галлия, в исходном состоянии легированных теллуром, наблюдалась одиночная полоса с  $h\nu_{\text{max}} = 1.20$  eV. Она практически не изменялась при облучении в течение 1–60 s. Слабо изменялась в результате СВЧ облучения при тех же



**Рис. 3.** Спектры фотолуминесценции образцов  $n\text{-GaAs}:\text{Sn}$ :  $a$  — исходный;  $b, c$  — после СВЧ облучения в течение 6 (62) s.



**Рис. 4.** Спектры фотолуминесценции образцов в  $n\text{-InP}$  (111):  $a$  — исходный;  $b-d$  — после СВЧ облучения в течение 10, 30, 40 s.



**Рис. 5.** Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики диода Шоттки на основе TiN—GaAs: *a, b* — прямая (обратная) ветвь ВАХ; *c* — ВФХ; *d* — зависимость  $1/C^2$  от  $V$ ; 1 — исходная, 2 — после СВЧ облучения в течение 2 с.

экспозициях и структура локальных центров в монокристаллах фосфида галлия.

В табл. 2 приведены результаты воздействия СВЧ излучения в течение 1–2 с на электрофизические параметры поверхностно-барьерных диодов Шоттки. Из табл. 2 видно, что в результате СВЧ облучения произошло заметное изменение свойств межфазных границ и приповерхностных слоев полупроводника, сопровождающееся изменением основных параметров барьера, а именно увеличилась высота барьера  $\varphi_B$ , уменьшился фактор идеальности  $n$ , возросла диффузионная длина неосновных носителей заряда  $L_p$ . Последнее свидетельствует о стимулированных СВЧ излучением процессах геттерирования в приповерхностных слоях арсенида галлия и фосфидов индия и галлия.

На рис. 5, *a* приведены типичные ВАХ поверхностно-барьерного диода. Видно, что после СВЧ облучения в течение 2 с протяженность экспоненциального участка прямой ветви ВАХ возросла на порядок, высота ба-

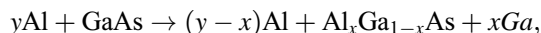
рьера  $\varphi_B$  практически не изменилась, фактор идеальности  $n$  уменьшился. На обратной ветви ВАХ (рис. 5, *b*) значительно уменьшилась величина обратного тока  $I_R$ . При этом, как видно из ВФХ (рис. 5, *c, d*), ее наклон практически не изменился. Это свидетельствует о том, что концентрация легирующей примеси в результате воздействия СВЧ излучения той же, что и в исходном материале.

Наблюдаемые изменения параметров диодных структур являются следствием структурно-химической перестройки межфазных границ в контакте металл–полупроводник, стимулированных СВЧ излучением. Для выяснения особенностей межфазных взаимодействий были проанализированы оже-профили компонентов металл–полупроводник на примере контактов, образованных платиной, титаном и алюминием с арсенидом галлия. Оказалось, что для каждого из рассматриваемых контактов можно выделить свои, не присущие другим контактам особенности. Так, для контакта Pt—GaAs межфазные

взаимодействия описываются реакцией



а для контакта Al–GaAs характерной является реакция замещения



хотя для протекания таких реакций нужны сравнительно высокие температуры, не достижимые в нашем эксперименте, равно как и времена, большие 1 с. В структурах Au–Ti–GaAs преимущественным оказалось вызванное СВЧ излучением перемешивание компонентов контакта при наличии после СВЧ обработки значительной доли оксидной фазы титана. Указанные взаимодействия, по-видимому, обуславливают переход от сильно деградированных гетерогенных границ раздела металл–полупроводник к более однородным. Это способствует наблюдаемым изменениям параметров приборных структур.

Рассмотрим другие вероятные механизмы, обуславливающие обнаруженные изменения свойств контактов металл–полупроводник.

1. Термический, связанный с разогревом за счет поглощения СВЧ энергии [6]. Анализ профилей распределения компонентов структур в контактах до и после СВЧ облучения и их сравнение с результатами послойного анализа термически отожженных контактов свидетельствуют о слабом влиянии этого фактора.

2. Электростатический, связанный с реальной величиной падения напряжения на барьере [6]. Даже в отсутствие критических электрических полей, определяющих механизмы лавинного и туннельного пробоя, этот механизм может оказывать существенное влияние на диффузионные перераспределения компонентов контакта, как это было показано в [6]. Интенсивная интердиффузия между металлом и арсенидом галлия начинается на уровне поглощаемой мощности, составляющей примерно 2/3 критического значения мощности пробоя. Однако, согласно оценкам, сделанным в [6], этот фактор при использованном режиме облучения не играет существенной роли.

3. Электродинамический, связанный с отклонением электронной подсистемы полупроводника от термодинамического равновесия за счет возникновения горячих носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника и обусловленного этим изменения примесно-дефектного состава этого слоя [7]. Близость электрофизических параметров поверхностно-барьерных структур, подвергнутых воздействию СВЧ излучения и  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  (где заданный механизм является определяющим), указывает на его доминирующую роль в процессах структурно-примесной перестройки дефектов при микроволновых воздействиях [8].

4. Возникновение нестационарных градиентов упругих напряжений, вызванных практически мгновенным разогревом неупорядоченных областей полупроводника, возникающих в процессе формирования контактной

структуры. В этом случае профили распределения компонентов контактной пары до и после облучения могут практически не измениться. В то же время, учитывая возможность реализации коллективных взаимодействий в полях упругих напряжений, можно значительно понизить барьер для анигиляции дефектов или перестройки комплексов дефектов [9,10].

## Заключение

Изучено влияние СВЧ излучения сантиметрового диапазона длин волн на электрофизические свойства массивных полупроводниковых материалов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0.22-0.24$ ), арсенида галлия и фосфидов индия и галлия, а также приборных структур с барьером Шоттки на основе арсенида галлия и фосфидов индия и галлия. Показана возможность улучшения параметров материалов и диодных структур за счет стимулированного СВЧ излучением геттерирования дефектов, а именно увеличения времени жизни неосновных носителей заряда, уменьшения обратного тока, уменьшения разброса параметров барьера Шоттки (высоты барьера и фактора идеальности).

Для окончательного вывода о процессах, протекающих в полупроводниках и приборных структурах на их основе при СВЧ воздействиях, требуются дальнейшие исследования. В то же время обнаруженные нами изменения в материалах и на границах фаз позволяют надеяться на возможность использования таких воздействий для технологических целей.

## Список литературы

- [1] *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 296 с.
- [2] *Блудов С.Б., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А.* и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7. С. 712–717.
- [3] *Абдурахимов Д.Е., Верецагин В.Л., Калинушкин В.П.* и др. // Краткие сообщения по физике. 1991. № 6. С. 27–29.
- [4] *Kryshab T.G., Lytvin P.M., Masin M.A., Prokopenko I.V.* // Metal Phys. and Adv. Technol. 1997. Vol. 19. N 3. P. 71–77.
- [5] *Миленин В.В., Конакова Р.В., Статов В.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 4. С. 32–34.
- [6] *Антипин В.В., Головицын В.А., Громов Д.В.* и др. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 1. С. 37–53.
- [7] *Синицук И.К., Чайка Г.Е., Шишияну Ф.С.* // ФТП. 1985. Т. 19. Вып. 4. С. 674–677.
- [8] *Borkovskaya O.Ya., Dmitruk N.L., Konakova R.V.* et al. // Submicron Devices (Proc. NATO Adv. Study Inst.) / Ed. A.-P. Jauho, E.V. Buzaneva. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996. P. 386–389.
- [9] *Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И.* // ФТП. 1987. Т. 21. Вып. 8. С. 1495–1496.
- [10] *Беляев А.Е., Беляев А.А., Венгер Е.Ф.* и др. // VI Междунар. Крымская конф. "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь: Вебер, 1967. С. 71–89.