

Национальная Академия наук Украины
Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины
Институт физики полупроводников НАН Украины им. В.Е. Лашкарева
Институт физики НАН Украины
Национальный технический университет Украины «КПИ»
Национальный технический университет «Львовская политехника»
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова
Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова.

Сборник научных трудов
VIII Международной научной конференции

«ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БАЗА НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»

28 сентября - 2 октября 2015г.
Харьков – Одесса
2015

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ *p-n* ПЕРЕХОДОВ В МЛЭ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $Cd_xHg_{1-x}Te$, СФОРМИРОВАННЫХ ИОННЫМ ТРАВЛЕНИЕМ

Ижнин И.И.^{1,2}, Войцеховский А.В.², Коротаев А.Г.², Фищич Е.И.³, Бончик А.Ю.⁴,
Савицкий Г.В.⁴,

Мынбаев К.Д.⁵, Варавин В.С.⁶, Дворецкий С.А.⁶, Михайлов Н.Н.⁶, Якушев М.В.⁶

¹Научно-производственное предприятие "Карат"

79031, Львов, ул. Стрыйская 202, тел. (032) 263-10-65, E-mail: i.izhnin@carat.electron.ua

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина 36, тел. (3822) 41-27-72, E-mail: vav@elefot.tsu.ru

³Академия сухопутных войск имени Петра Сагайдачного

79000, Львов, ул. Гвардейская 32, тел. (032) 243-17-13, E-mail: o_fitsych@ukr.net

⁴Институт прикладных проблем механики и математики НАН Украины
им. Я.С. Пидстригача

79060, Львов, ул. Научная 36, тел. (032) 258-51-39, E-mail: surface@apmm.lviv.ua

⁵Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

194021, С.-Петербург, ул. Политехническая 26, тел. (812) 292-71-82, E-mail:
mynkad@mail.ioffe.ru

⁶Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 13, тел. (383) 330-49-67, E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Results of experimental studies of long-term (~7 years) stability at the room temperature of electron concentration in HgCdTe-based *p-n* junctions fabricated with ion milling (IM) are presented. It is shown that after short-term relaxation (~10⁴ min) after IM electron concentration in different HgCdTe heterostructures (un-doped, doped with In or As) grown by molecular-beam epitaxy (MBE) on GaAs substrates stabilizes at ~10¹⁵ cm⁻³ and does not change in 7 years of storage of the films. In contrast to that, in heterostructures grown by MBE on Si substrates, electron concentration after short-term relaxation continues slightly to decrease during all the period of storage and gets order 10¹⁴ cm⁻³. For such films, indium donor doping of the material is recommended.

Введение

Твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) продолжают оставаться основным материалом для создания фотоприемников инфракрасного диапазона (длины волн 2–20 мкм) с предельными параметрами. Такой статус КРТ обусловлен особенностями зонной структуры этого материала, и по оценкам специалистов он будет сохраняться ещё по крайней мере два десятилетия [1]. При этом наиболее перспективным методом роста эпитаксиальных структур является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ).

Одним из методов формирования *p-n*-переходов фотодиодов в вакансионно-легированном или легированном акцепторной примесью As КРТ *p*-типа проводимости является ионное травление (ИТ). В основе этого метода лежит специфическое взаимодействие низкоэнергетических (100–1000 эВ) ионов (преимущественно Ar) с поверхностью КРТ. В результате ИТ в КРТ формируется типичная *n-n-p* или *n-n* структура с радиационно-нарушенным *n*-слоем (толщиной ~1–3 мкм) и основным *n*-слоем (его толщина зависит от исходных параметров материала и режимов ИТ и может достигать сотен микрон). Именно основной *n*-слой характеризуется постоянными по его толщине значениями концентрации и подвижности электронов, которые соответствуют высококачественному материалу с низким уровнем компенсации, и который и определяет параметры фотодиодов. В процессе ИТ в приповерхностной области КРТ формируется источник неравновесной междоузельной ртути (Hg_i) с чрезвычайно высокой концентрацией (~10¹⁴ см⁻³, против ~10⁶ см⁻³ для равновесной концентрации). С одной стороны, это предопределяет сверхбыстрое продвижение фронта диффузии Hg_i (большие глубины) и полную аннигиляцию вакансий ртути (конверсию типа проводимости в материале *p*-типа и модификацию – снижение уровня компенсации

в материале n -типа). С другой стороны, высокая концентрация Hg, приводит к формированию в модифицированном (конвертированном) слое донорных центров и комплексов с наиболее известными для КРТ акцепторными примесями (As, Sb, Cu, Ag и Au) и определенными структурными нейтральными дефектами (предположительно, наноконplexами теллура). Наиболее характерной особенностью модифицированных ИТ слоев является выраженная релаксация (изменение) электрических параметров модифицированного (или конвертированного) n -слоя после прекращения ИТ в течение 10^3 – 10^5 мин. в процессе хранения образцов при комнатной температуре (будем называть такую релаксацию коротковременной) [2]. Релаксация связана с распадом донорных комплексов, сформированных междоузельной ртутью с неконтролируемыми акцепторными примесями и наноконplexами Te вследствие быстрого уменьшения концентрации Hg, после прекращения ИТ. Данный факт требовал проведения специальных исследований по долговременной стабильности параметров сформированного при помощи ИТ n -слоя. Целью настоящей работы было исследование количественных характеристик релаксации параметров n -структур, сформированных ИТ, в течение долговременного хранения (более 7 лет).

Эксперимент

Для исследований были использованы образцы эпитаксиальных структур (ЭС) КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках (013)GaAs или Si с буферным слоем CdTe/ZnTe [3]. В типичной ЭС на границах активного слоя $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (состав $x_a \sim 0.2$ – 0.3) толщиной $d \sim 6$ – 8 мкм выращивали варизонные широкозонные слои с толщинами нижнего и верхнего слоев $\sim 1,0$ и $\sim 0,3$ мкм соответственно и изменением состава от x_a до $x \sim 0,45$. Исследовали как номинально нелегированные, так и легированные акцепторной (As) или донорной (In) примесью структуры n -типа проводимости (после роста), и/или p -типа (после соответствующих отжигов). Параметры образцов после роста и ИТ определяли путем измерения полевых зависимостей коэффициента Холла $R_H(B)$ и проводимости $\sigma(B)$ при $T=77$ К в магнитных полях B от 0,01 до 1,5 Тл. Полученные зависимости анализировали методом дискретного анализа спектров подвижности, в результате чего получали параметры (концентрацию и подвижность электронов) исходного образца или основного объема модифицированного ИТ n -слоя.

ИТ осуществляли ионами Ag^+ на установке ИВ-3 фирмы ЕИКО (Япония) при следующих режимах: энергия – 500 эВ, плотность тока – 0,2 мА/см², время – 20 мин. Исследование процесса коротковременной (порядка 200000 мин.) релаксации электрических параметров проводили путем последовательных измерений при 77 К $R_H(B)$ и $\sigma(B)$ образцов, которые выдерживали между измерениями при комнатной температуре. Далее образцы сохраняли при комнатной температуре на протяжении 6–8 лет. Последнее измерение было проведено в декабре 2014 г.

Результаты и обсуждение

МЛЭ структуры КРТ на подложках GaAs ($x_a \sim 0.2$, легированные As).

В ходе многочисленных предыдущих исследований процессов релаксации концентрации электронов в основном объеме модифицированного ИТ n -слоя в МЛЭ структурах КРТ на подложках GaAs различного типа (номинально нелегированных n -типа, вакансионно-легированных p -типа, легированных As и активированных p -типа) было показано, что после коротковременной релаксации (порядка 200000 мин) концентрация электронов $n_{77}(f)$ является постоянной и достигает характерного значения $(2\text{--}3) \cdot 10^{15}$ см⁻³, которое отождествлялось с концентрацией донорного фона. В частности, показано, что ИТ является единственным методом для определения донорного фона в легированном As КРТ. При этом оставались невыясненными механизм распада донорных

центров, сформированных междуузельной ртутью с акцепторной примесью As (As в подрешетке Te) и влияние примеси As на величину $n_{77}(f)$.

Долговременная релаксация в легированном As КРТ исследована на тех же образцах, на которых ранее исследовали коротковременную релаксацию [4]. Образцы М6 и М19 проходили активационный отжиг и характеризовались p -типом проводимости (табл.1). Исследованы также послеростовые образцы (без активационного отжига) n -типа проводимости М5 and М9, выращенные с крекингом при высокой температуре зоны крекинга (в этом случае мышьяк в потоке присутствует в виде димера As_2). Концентрация As во всех образцах по данным вторичной ионной масс спектроскопии была на уровне 10^{16} см^{-3} .

Таблица 1

Параметры МЛЭ структур на подложках GaAs, легированные мышьяком				
Образец / Параметр	М19	М6	М5	М9
x_a	0.23	0.22	0.22	0.22
Тип проводимости	p	p	n	n
$n(p)_{77}, \text{ см}^{-3}$	$1.25 \cdot 10^{16}$	$1.13 \cdot 10^{16}$	$6.40 \cdot 10^{15}$	$2.30 \cdot 10^{16}$
$\mu_{n(p)77}, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	435	400	57300	36500

Релаксационные кривые концентрации и подвижности электронов в модифицированном ИТ основном объеме n -слоя для образцов М6 и М19 представлены на рис. 1. Учитывая, что в данных образцах концентрация дефектов n -типа As_{Hg} , связанных с амфотерным характером мышьяка в КРТ, мала, то после ИТ и релаксации концентрация электронов определяет концентрацию донорного фона, которая была равна $(2-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и согласуется с общим свойством МЛЭ КРТ на подложках GaAs.

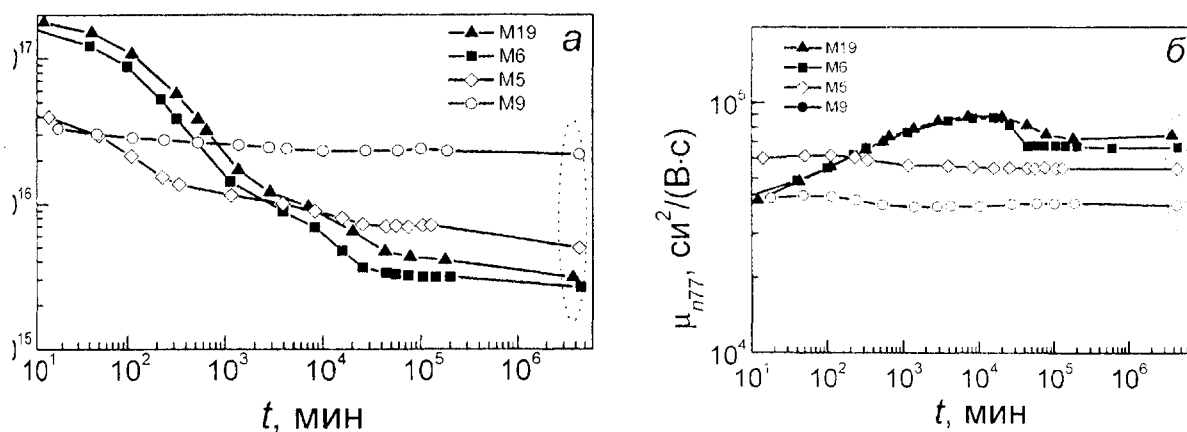


Рис. 1. Временные зависимости концентрации (а) и подвижности электронов (б) в конвертированном (модифицированном) ионным травлением n -слое в структурах М19, М6, М5 и М9. Последние точки – результаты после долговременной релаксации.

Видно, что в течении долговременной релаксации (порядка 8 лет) концентрация электронов n_{77} и их подвижность μ_{n77} практически оставались постоянными. Эти данные свидетельствуют, что релаксация концентрации электронов связана с распадом донорных комплексов $Hg_j^+ - As_{Te}^-$, образованных при ИТ междуузельной ртутью (Hg) с атомами мышьяка в подрешетке Te (As_{Te}). При этом, распад этих комплексов происходит через образование нейтральных комплексов $Hg_j^0 - As_{Te}^0$, стабильных при комнатной температуре, что и дает возможность проявить донорный фон.

В послеростовых образцах n -типа М5 и М9, в зависимости от величины потока мышьяка при росте, димерные молекулы As_2 встраиваются в решетку КРТ не как $As_{НБ}$, а в виде донорных комплексов типа As_2Te_3 [4]. При ИТ междоузельная ртуть не взаимодействует с этими комплексами, поэтому для таких образцов определение величины истинного донорного фона не возможно. Наблюдаемая незначительная релаксация $n_{77}(f)$ на начальной стадии для образца М5 связана с наличием избыточного Те (недостаточный поток As) и распадом образованных при ИТ донорных комплексов $Hg-Te$. В общем, результаты долговременной релаксации свидетельствуют, что легирование As не влияет на величину донорного фона.

МЛЭ структуры КРТ на подложках Si ($x_a \sim 0.2-0.3$, номинально нелегированные).

Долговременная стабильность концентрации электронов в модифицированном ИТ слое $n_{77}(f)$ была исследована на образцах, для которых коротковременная релаксация была ранее исследована в [5]. Послеростовые структуры характеризовались n -типом проводимости (образцы №№ Ms4, Ms6 и Ms8). Аналогичные вакансионно-легированные образцы p -типа проводимости были получены термическим отжигом в атмосфере гелия при температуре $230^\circ C$ в течении 20 часов (образцы №№ Ms3, Ms5 и Ms7). Параметры образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры МЛЭ структур на подложках Si

Образец / Параметр	Ms4	Ms3	Ms6	Ms5	Ms8	Ms7
x_a	0.29	0.29	0.25	0.25	0.23	0.23
Тип проводимости	n	p	n	p	n	p
$n(p)_{77}, \text{см}^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{13}$	$7.7 \cdot 10^{15}$	$5.6 \cdot 10^{14}$	$7.1 \cdot 10^{15}$	$2.0 \cdot 10^{14}$	$2.2 \cdot 10^{16}$
$\mu_{n(p)77}, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	38400	320	50500	410	105000	390

Релаксационные кривые концентрации и подвижности электронов основного объема модифицированного (конвертированного) n -слоя для исследованных структур приведены на рис. 2. Как видно, в этих образцах концентрация электронов после коротковременной релаксации ($\sim 2 \cdot 10^5$ мин) достигала величины порядка $(2-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, была на порядок ниже, чем для структур на подложках GaAs, и на ряде образцов была видна тенденция к дальнейшему уменьшению (рис. 4а). Исследование долговременной стабильности концентрации электронов подтвердило эту тенденцию. В течении длительного хранения концентрация электронов во всех образцах продолжала незначительно уменьшаться, хотя подвижность была практически неизменной (Рис. 4б). Поскольку концентрация электронов после релаксации $n_{77}(f)$ отражает величину неконтролируемого донорного фона, то следует подчеркнуть, что МЛЭ структуры КРТ на кремниевых подложках, выращенные данной технологией, характеризуются высокой чистотой. С другой стороны, для получения стабильной и контролируемой концентрации электронов в n -областях фотодиодов в данных образцах рекомендуется специальное легирование донорной примесью, например индием.

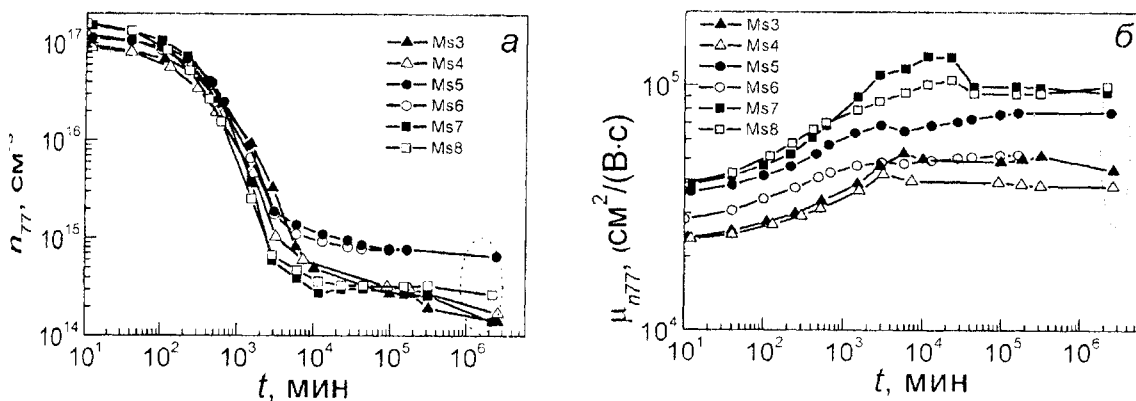


Рис. 2. Временные зависимости концентрации (а) и подвижности электронов (б) в конвертированном (модифицированном) ионным травлением n -слое в структурах Ms3, Ms4, Ms5, Ms6, Ms7 and Ms8. Последние точки – результаты после долговременной релаксации.

Выводы

Исследование долговременной стабильности концентрации электронов в сформированных ИТ слоях МЛЭ HgCdTe n -типа проводимости показало, что стабильность зависит от технологии (типа подложки) и характера легирования. В образцах, выращенных на подложках GaAs, донорный фон (концентрация электронов) составляет величину $\sim(2-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и остается стабильной в течении 6–8 лет хранения при комнатной температуре, что достаточно для большинства применений ИК фотодиодов. В МЛЭ образцах, выращенных на подложках Si, концентрация донорного фона составляет величину порядка $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, и в процессе долговременного хранения при комнатной температуре наблюдается хотя и незначительное, но уменьшение концентрации электронов. Для повышения стабильности фотодиодов, в этом случае, рекомендуется контролируемое легирование донорной примесью индия до концентраций порядка $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ с целью стабилизации донорного фона. Показано, что распад донорных комплексов, сформированных ИТ в легированных мышьяком образцах p -типа, происходит через образование нейтральных стабильных при комнатной температуре комплексов. В общем, концентрация донорного фона в КРТ с использованием ИТ может определяться по концентрации электронов после коротковременной релаксации.

Список литературы:

1. Rogalski A. Infrared Detectors. Second Edition – N.Y.: CRS Press, 2011. – 900 p.
2. Belas E., Bogoboyashchii V.V., Grill R., Izhnin I.I., Vlasov A.P., Yudenkov V.A. // J. Electron. Mater. – 2003. – Vol. 32, N 7, P. 698–702.
3. Varavin V.S., Vasiliev V.V., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Ovsyuk V.N., Sidorov Yu.G., Suslyakov A.O., Yakushev M.V., Aseev A.L. // Opto-Electr. Rev. – 2003. – Vol. 11, N 2. – P. 99–111.
4. Izhnin I.I., Dvoretzky S.A., Mynbaev K.D., Fitsych O.E., et al. // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115, No. 16. Art. 163501.
5. Izhnin I.I., Izhnin A.I., Savvitskiy H.V., Vakiv M.M., et al. // Semicond. Sci. Technol. – 2012. – Vol. 27, N. 3. Art. 035001.

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
VIII Международной научной конференции
« ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БАЗА НАНОЭЛЕКТРОНИКИ »

Ответственные за выпуск:

Н.И. Слипченко

Е.С. Булавина

Компьютерная верстка:

Е.С. Полякова

Материалы сборника публикуются в авторском варианте
без редактирования

Подписано к печати 22.09.2015. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Печать ризографическая.
Усл. печ. лист. 29,53. Тираж 200 экз. Зак. № 0922/1-15.

Напечатано с готовых оригинал-макетов в типографии ФЛП Азамаев В.Р.
Свидетельство государственной регистрации: серия В02 №229278 от 25.11.1998 г.
Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности в
государственный реестр издательств и производителей печатной
продукции: серия ХК №135 от 23.02.2005 г.
г. Харьков, ул. Познанская, д. 6, к. 84, тел. (057) 362-01-52
e-mail: bookfabrik@rambler.ru

Сенюта В.С.	86
Серба О.А.	241, 246
Скобеева В.М.	270
Слабый К.Г.	211
Слипченко Н.И.	98, 106, 110, 184, 196
Слипченко Н.И.	234, 238, 262, 266
Слободянюк Д.В.	143
Слусар Т.В.	241
Сминтина В.А.	222
Смынтына В.А.	270
Сорока В.І.	246
Сохацкий В.П.	120
Спевак И.С.	27
Стороженко И.П.	159

Т

Тарапов С. И.	35, 38, 43
Тарасенко А.С.	83
Тарасенко С.В.	83
Тимченко М.А.	27
Титов И.Н.	59
Толков А.Н.	86
Трипачко Н.А.	10

У

Уварова И.Ю.	10
Урсой Е.Ю.	128

Ф

Фицич Е.И.	171
Філевська Л. М.	222

Х

Хоменко Д.В.	241, 258
-------------------	----------

Ч

Черненко В.В.	241, 246
Чугай О.Н.	167

Ш

Швец Е.Я.	135
Шевченко Б. В.	90
Шевченко Н.А.	66
Шеруда В.Ю.	128
Шматко И.О.	79
Шматко О.А.	79
Шматько А.А.	94
Шпилевой П.Б.	218
Шульга С.Н.	98

Щ

Щербак Е.Л.	262, 266
------------------	----------

Я

Якушев М.В.	171
Ярошенко А.Н.	159
Ясковец И.И.	10