

УДК 621.383.4/5
ББК 32.86
Т 78

Т78 Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения в 2-х томах. Том 1. – М.: АО «НПО «Орион», 2018 г. – М.: Издательство «ОФСЕТ МОСКВА», 2018. – 611 с.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-366-5 (Т.1)

Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «Орион» раз в 2 года проводит Международную научно-техническую конференцию и школу по фотоэлектронике и приборам ночного видения. В конференции принимают участие специалисты отечественных и зарубежных организаций, связанных с разработкой и производством изделий фотоэлектроники, приборов ночного видения, тепловизионной техники и смежных отраслей. Данный сборник состоит из двух томов. Том 1 содержит пленарные и устные доклады, том 2 – стендовые доклады, представленные на XXV конференции, состоявшейся 24–26 мая 2018 г.

Сборник предназначен для специалистов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области разработки и применения изделий фотоэлектроники и оптико-электронных систем, а также для преподавателей, студентов и аспирантов соответствующих специальностей вузов.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-366-5 (Т.1)

У70 About features of Hall effect in the $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ MBE and LPE heteroepitaxial structures in the pulse magnetic field up to 55 T

¹ Talipov N.Kh., ² Voitsekhovskii A.V., ³ Nikitin M.S.

¹ Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Force, Balashiha, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³ Ferrotec Nord Corp., Moscow, Russia

⁴ Giredmet, Moscow, Russia

E-mail: niyazt@yandex.ru

The Hall effect in the $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ MBE and LPE heteroepitaxial structures has been measured in pulse magnetic field up to 55 T at $T=4,2\text{--}120$ K. There is a shift of Hall resistance to the positive area in the both material in the strong magnetic field. This shift is caused by existence in material of hole conductivity, which is shown when for electrons the parameter $\mu_n B \gg 1$. Presence of the acceptor centers in the MBE and LPE heteroepitaxial structures, in our opinion, is due to tellurium atoms in the interstitial position.

У71 Радиационные донорные дефекты в имплантированных As МЛЭ пленках CdHgTe

^{1,2} Ижнин И.И., ¹ Сыворотка И.И., ² Войцеховский А.В., ² Коротаев А.Г., ³ Мынбаев К.Д.,

⁴ Варавин В.С., ^{2,4} Дворецкий С.А., ⁴ Михайлов Н.Н., ⁴ Ремесник В.Г., ⁴ Якушев М.В., ⁵ Świątek Z.

¹ Научно-производственное предприятие «Электрон-Карат», г. Львов, Украина

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁵ Institute of Metallurgy and Material Science PAN, Kraków, Poland

E-mail: i.izhnin@carat.electron.ua

Эпитаксиальные пленки твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) – основной материал для создания фотоприемников (ФП) инфракрасного диапазона спектра [1]. Для *ex situ* формирования $p\text{--}n$ переходов при создании ФП на основе КРТ часто используется ионная имплантация (ИИ). Имплантация всегда приводит к образованию большого количества различных дефектов, влияющих на свойства $p\text{--}n$ переходов и, в конечном счете, самих ФП. Дефектную структуру имплантированной области часто исследуют электронной микроскопией (см., например, [2, 3]), однако с точки зрения работы $p\text{--}n$ перехода важным является исследование электрических свойств этой области, и в особенности, профиля распределения электрически активных дефектов. Подробно изучить такой профиль можно с использованием методов анализа спектров подвижности с послойным стравливанием материала. Подобное исследование было выполнено, например, для структур КРТ n^+p , полученных имплантацией бора [4], однако для структур p^+n , получающих всё более широкое распространение благодаря возможности уменьшить темновые токи ФП и увеличить длину волны его фотоответа (либо повысить рабочую температуру) [5, 6], таких исследований, насколько известно авторам, пока не проводилось. В настоящей работе мы сообщаем о результатах исследования донорных радиационных дефектов, выполненного на основе материала, имплантированного мышьяком, – наиболее распространенной акцепторной примесью в современной эпитаксиальной технологии КРТ.

Для исследований были использованы эпитаксиальные структуры (ЭС) КРТ, выращенные молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) на подложках Si (013) с буферным слоем

CdTe/ZnTe [7]. В типичной структуре активный слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с составом $x_a \sim 0,221$ толщиной ~ 9 мкм был заключен между двумя варизонными слоями с увеличением состава к поверхности от x_a до $x \sim 0,45$ и толщиной $\sim 0,4$ мкм. После роста ЭС имели n -тип проводимости с концентрацией электронов $\sim 3,9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что определялось введенной при росте примесью In. Для исследований мы использовали пленки p -типа проводимости, полученные термическим отжигом в атмосфере He, концентрация дырок составляла $5,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Исследовались два идентичных образца с сохраненным (Mi13) и удаленным (Mi18) варизонным поверхностным слоем, подвергнутых имплантации ионами As^+ с энергией 190 кэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} . Отжиг для активации мышьяка после ИИ не проводился.

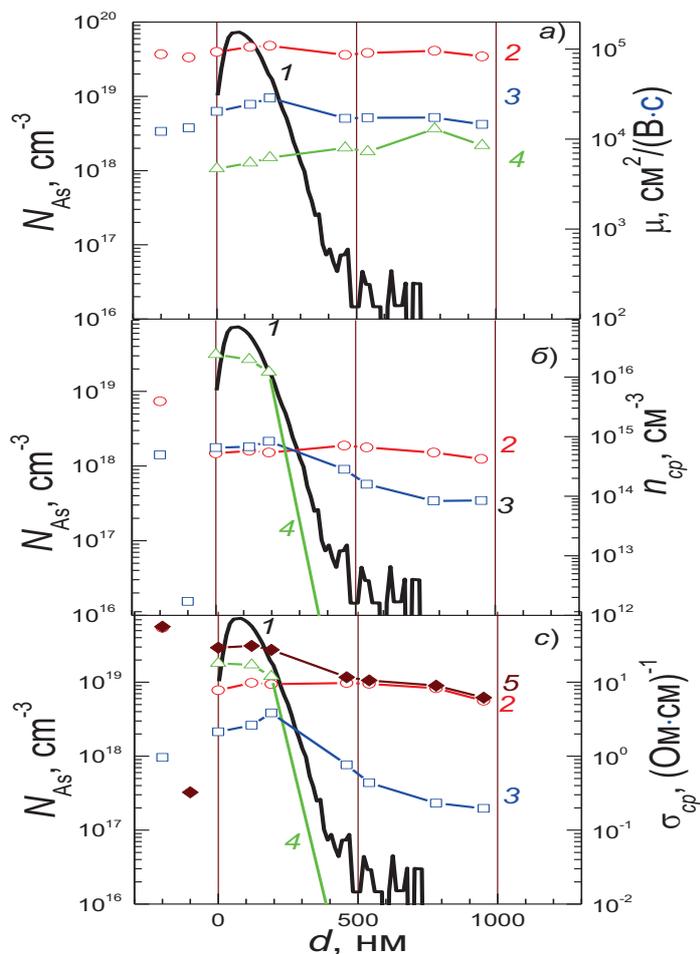


Рисунок 1. Профили распределения по глубине образца Mi13 концентрации ионов As N_{As} (1) и параметров выявленных носителей (2–4): подвижность μ (а), средняя концентрация n_{cp} (б) и средняя парциальная проводимость σ_{cp} (в). На изображении (с) также показаны экспериментальные значения интегральной проводимости (кривая 5)

подвижностью (4) порядка $5000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и дырки, вклад в проводимость которых пренебрежимо мал (их параметры поэтому плохо разрешаются и данные не показаны). Отметим, что средняя концентрация n_{cp} (Рис. 1б) и средняя парциальная проводимость σ_{cp} (Рис. 1в) здесь были рассчитаны на полную толщину слоя, оставшуюся после каждого шага травления. По полученным данным, в результате ИИ была сформирована n^+-n-p структура, аналогичная ранее изученным образцам [9]. В ней n^+ -область формируется радиационными протяженными и квазиточечными дефектами донорного типа (электроны с низкой и промежуточной подвижностью), n -область – в процессе диффузии междуузельной ртути и ее аннигиляции с вакансиями ртути

Электрические параметры ЭС после роста и отжига и распределение концентрации электрически активных радиационных дефектов после ИИ определяли путем измерения полевых зависимостей коэффициента Холла $R_H(B)$ и проводимости $\sigma(B)$ при $T=77 \text{ К}$ в магнитных полях $B=0.01-1.5 \text{ Тл}$ при послойном химическом травлении. Полученные зависимости анализировали методом дискретного анализа спектров подвижности (DMSA) [8], что позволило определить состав носителей и их параметры (концентрацию, подвижность и парциальную проводимость) после каждого шага травления. Анализ спектров подвижности имплантированных образцов Mi13 и Mi18 показал, что для них состав носителей был качественно одинаков. На Рис. 1 приведены данные для образца Mi13 с сохраненным варизонным слоем. Дополнительно там же при «толщине – 200» представлены параметры исходного образца n -типа проводимости Mi8-1, а при «толщине – 100» аналогичного образца p -типа после термического отжига. Вклад в проводимость дают 4 типа носителей: электроны с высокой подвижностью (2) порядка $90000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, электроны с промежуточной подвижностью (3) порядка $20000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, электроны с низкой

(толщина ее мала и по оценке составляет ~ 1 мкм), а p -область является собой оставшуюся часть исходной структуры p -типа проводимости.

Как видно на Рис. 1в, после ИИ и первых двух шагов травления (стравлено 120 и 190 нм) доминирующий вклад в проводимость дают электроны с низкой подвижностью (4).

После третьего шага травления (стравлено 480 нм) доминирующий вклад в проводимость дают электроны с высокой подвижностью. Они принадлежат n -области, которая расположена в глубине структуры, так что парциальная проводимость почти не изменяется на первых шагах травления.

Для исследования распределения концентрации различных типов электронов и их парциальной проводимости, в определенной мере отражающих распределение радиационных донорных дефектов, по значениям n_{cp} и σ_{cp} (средние) и толщины пленки d_j после каждого шага травления рассчитывали слоевую концентрацию N_s и слоевую парциальную проводимость Σ_s каждого типа носителей, $N_s = n_{cp} \cdot d_j$ и $\Sigma_s = \sigma_0 \cdot d_j$ (Рис. 2, точки).

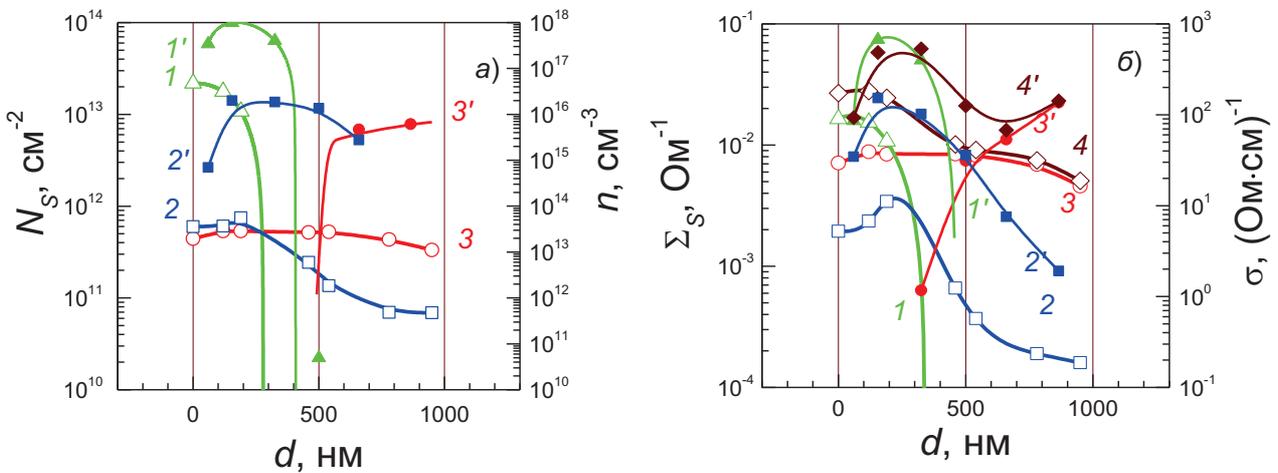


Рисунок 2. Распределение по глубине слоевой N_s (1, 2, 3) и объемной n (1', 2', 3') концентрации (а) и слоевой Σ_s (1, 2, 3) и объемной σ (1', 2', 3') проводимости (б) электронов с низкой (1, 1'), средней (2, 2') и высокой (3, 3') подвижностью в образце Mi13.

Точки и линии на кривых объемной концентрации электронов n (1', 2', 3') обозначают значения объемной концентрации электронов, рассчитанные по значениям слоевой концентрации в соответствии с соотношением:

$$n_j = \text{abs}(N_s(j) - N_s(j+1)) / (\Delta d_{j+1} - \Delta d_j), \quad j=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

где j – порядковый номер шага травления, $N_s(j)$ и Δd_j – значения слоевой концентрации и толщины стравленного слоя при j -ом шаге травления. При этом значение концентрации n_j представлено на графике для значений $\Delta d_j + (\Delta d_{j+1} - \Delta d_j) / 2$. Аналогично рассчитывали и объемную проводимость. Линии на всех зависимостях – аппроксимирующие кривые.

Анализ полученных зависимостей позволил подробно установить распределение радиационных донорных дефектов в имплантированных мышьяком пленках CdHgTe, выращенных МЛЭ. Так, электроны с низкой подвижностью 5000 см²/(В·с) локализованы в слое на глубине до 400 нм, совпадающим с областью локализации протяженных структурных дефектов и профилем ионов As [10]. Предполагается, что эти электроны связаны с образованием донорных дефектов путем захвата междоузельной ртути дислокационными петлями. Область локализации электронов со средней подвижностью ~ 20000 см²/(В·с) простирается на глубину порядка 700 нм. Природа дефектов, отвечающих данному типу электронов, связывается с образованием комплексов

междоузельной ртути с другими точечными дефектами. Электроны с высокой подвижностью $\sim 90000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ локализованы в n -области структуры, которая простирается на глубине более 700 нм. Полученные результаты проясняют детали дефектной структуры имплантированных мышьяком ЭС КРТ и могут быть полезны разработчикам фотоприемников на основе этого материала.

Литература

1. Rogalski A. Infrared Detectors: Second edition. New York: CRC Press, 2011. 876 p.
2. Lobre C., Jouneau P.H., Mollard L., Ballet P. // *J. Electron. Mater.* **43**(8) (2014) 2908-2914.
3. Bonchuk O.Yu., Savvitsky H.V., et al. // *Appl. Nanosci.* (2018), DOI 10.1007/s13204-018-0679-y.
4. Umana-Membreno G.A., Kala H., et al. // *J. Electron. Mater.* **42**(11) (2013) 3108-3113.
5. Kerlain A., Brunner A., Sam-Giao D., et al. // *J. Electron. Mater.* **45**(9) (2016) 4557-4562.
6. Bazovkin V.M., Dvoretzky S.A., Guzev A.A., et al. // *Infr. Phys. Technol.* **76** (2014) 72-74.
7. Якушев М.В., Брунев Д.М., Варавин В.С., Васильев В.В. и др. // *ФТП* **45**(3) (2011) 396-402.
8. Bogoboyashchyu V.V., Elizarov A.I., Izhnin I.I. // *Semicond. Sci. Technol.* **20**(8) (2005) 726-732.
9. Izhnin I.I., Voitsekhovskii A.V., Korotaev A.G., et al. // *Infr. Phys. Technol.* **81** (2017) 52-58.
10. Ижнин И.И., Фицыч Е.И. и др. // *Изв. ВУЗов. Физика* **60**(10) (2017) 92-97.

У71 Radiation donor defects in arsenic implanted CdHgTe MBE films

^{1,2} Izhnin I.I., ¹ Svorotka I.I., ² Voitsekhovskii A.V., ² Korotaev A.G., ³ Mynbaev K.D., ⁴ Varavin V.S.,
^{2,4} Dvoretzky S.A., ⁴ Mikhailov N.N., ⁴ Remesnik V.G., ⁴ Yakushev M.V., ⁵ Świątek Z.

¹ Scientific Research Company "Electron-Carat", Lviv, Ukraine

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³ Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

⁴ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

⁵ Institute of Metallurgy and Material Science PAN, Kraków, Poland

E-mail i.izhnin@carat.electron.ua

Distribution of electrically active radiation-induced donor defects in arsenic-implanted HgCdTe films grown with molecular-beam epitaxy was studied. Discrete mobility spectrum analysis was used for processing the data on electrical parameters of the implanted material acquired using step-by-step chemical etching. Three layers with electrons with different mobility were detected in the implanted area, and defects responsible for the formation of each layer were identified.

У72 Получение мышьяка высокой чистоты сублимационными методами

Калашник О.Н., Латышонок А.Н., Сомов А.В.

АО «Научно-исследовательский институт материаловедения
им. А.Ю. Малинина» (АО «НИИ МВ»), Москва, Россия

E-mail: npl280@niimv.ru

В настоящее время в Российской Федерации отсутствует производство высокочистого мышьяка, слитков и пластин арсенида галлия. Необходимое количество мышьяка марки 6N (около 400 кг/год) для производства монокристаллов арсенида галлия закупалось за рубежом (Япония и Китай).

В АО «НИИ МВ», в рамках решения задачи производства отечественного арсенида галлия, создан ряд опытно-промышленных установок получения мышьяка высокой чистоты сублимационным методом. Комплексная сублимационная технология включает в себя следующие