

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.315.592

Легирование ионами бора варизонных эпитаксиальных пленок МЛЭ КРТ

А. В. Войцеховский, Д. В. Григорьев, А. Г. Коротаев, А. П. Коханенко
Сибирский физико-технический институт при ТГУ, г. Томск, Россия

В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Ю. Г. Сидоров, Н. Н. Михайлов
ИФП СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Н. Х. Талипов

ООО "УралАлмазИнвест", Москва, Россия

Представлены экспериментальные результаты по облучению ионами бора эпитаксиальных пленок КРТ с различными варизонными слоями в приповерхностной области материала. Показано, что наблюдаемые отличия результатов ионной имплантации в эпитаксиальные пленки МЛЭ КРТ с переменным составом в области внедрения имплантанта и объемный материал КРТ главным образом обусловлены различной динамикой накопления электрически активных радиационных дефектов и зависимостью электрофизических свойств материала от состава КРТ. Анализ распределения электрически активных дефектов по глубине облученного материала свидетельствует о том, что дополнительные факторы, связанные с наличием градиента состава в области внедрения имплантанта, не оказывают определяющего влияния на миграцию первичных радиационных дефектов.

Полупроводниковые узкозонные растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) являются одним из основных материалов для создания чувствительных элементов инфракрасных (ИК) фотоприемных устройств на диапазон длин волн 8—14 мкм. В настоящее время эпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), — наиболее перспективный материал для создания многоэлементных полупроводниковых детекторов ИК-излучения, обеспечивающих обработку сигнала непосредственно в фокальной области [1, 2]. Одним из основных применяемых технологических методов создания фотодиодных структур является имплантация ионов бора [3, 4]. Следует также отметить, что в последнее время для улучшения рабочих характеристик изготавливаемых приборных структур используется эпитаксиальный материал с различными варизонными слоями, в частности в приповерхностной области структуры [5, 6]. Поэтому становится актуальным изучение процессов радиационного дефектообразования при ионной имплантации в КРТ с переменным составом в области внедрения имплантанта.

Впервые проведенные авторами эксперименты по исследованию влияния облучения ионов аргона и молекулярного азота на электрофизические параметры облученных эпитаксиальных пленок по-

зволили предположить, что наблюдаемые отличия ионной имплантации в гетероэпитаксиальный МЛЭ КРТ по сравнению с имплантацией в объемные кристаллы КРТ можно объяснить влиянием приповерхностного варизонного слоя на процессы радиационного дефектообразования [7]. В то же время вопрос установления основных факторов этого влияния остается открытым. В связи с этим цель данной работы — исследование влияния имплантации ионов бора на электрофизические характеристики эпитаксиальных пленок КРТ с различным распределением состава материала в области внедрения имплантанта.

Образцы и методика измерений

Для проведения исследований в ИФП СО РАН г. Новосибирска методом МЛЭ были специально выращены эпитаксиальные пленки с различным распределением состава в приповерхностной области материала. После выращивания пленки имели n -тип проводимости с концентрацией $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Для конвертирования в p -тип их отжигали в нейтральной атмосфере водорода или гелия [1]. Параметры эпитаксиальных структур после отжига представлены в таблице.

Исходные параметры эпитаксиальных структур

Серия №	d , мкм	p , см ⁻³	μ_p , см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹
1	10,8	$8,0 \cdot 10^{15}$	550
2	10,1	$7,4 \cdot 10^{15}$	530
3	10,9	$7,8 \cdot 10^{15}$	510
4	10,7	$3,3 \cdot 10^{15}$	500

Примечание. d , p , μ_p – толщина пленки, концентрация и подвижность дырок, соответственно.

Для экспериментов были подготовлены четыре серии эпитаксиальных пленок по 10 образцов в каждой. Распределение состава в приповерхностном варизонном слое эпитаксиальных пленок показано на рис. 1.

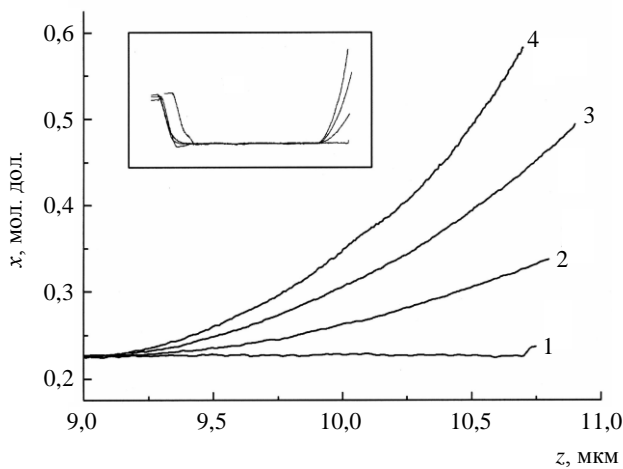


Рис. 1. Распределение состава x по глубине приповерхностного варизонного слоя эпитаксиальной пленки $Cd_xHg_{1-x}Te$.

Номер кривой соответствует номеру серии образца в таблице. На вставке — распределение состава x по всей глубине эпитаксиальной пленки

Облучение ионами бора проводили при комнатной температуре на ускорителе ионов в непрерывном режиме в диапазоне доз 10^{11} — $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² и энергий 20—150 кэВ, плотность тока ионов $j = 0,001$ — $0,2$ мкА·см⁻². Измерения электрофизических параметров образцов до и после облучения проводили при температуре жидкого азота методом ЭДС Холла в конфигурации Ван-дер-Пау. Распределение концентрации электронов по глубине полупроводника определяли методом дифференциальных холловских измерений. Удаление тонких слоев материала осуществляли путем химического травления в 0,02%-ном растворе брома в диметилформамиде. Скорость травления определяли на спутниковом образце по высоте ступеньки, измеренной на микроскопе МИИ-4 после многократного повторения циклов удаления материала.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измерения электрофизических параметров образцов после имплантации показали, что облучение ионами бора эпитаксиальных пленок КРТ приводит к конверсии типа проводимости, образованию в приповерхностной области материала высоколегированного n^+ -слоя вследствие генерации в процессе облучения радиационных дефектов (РД), проявляющих донорные свойства [8—14]. Зависимость слоевой концентрации носителей заряда N_S от дозы облучения представлена на рис. 2, из которого видно, что для всех образцов при увеличении дозы облучения и энергии имплантанта наблюдается монотонное возрастание зависимости $N_S(\Phi)$. Однако при одной и той же дозе облучения значение N_S для каждой серии образцов отличается и зависит от распределения состава материала в области внедрения имплантанта. Для образцов эпитаксиальных пленок серии 1 наблюдается характерное поведение зависимости $N_S(\Phi)$, которое отмечается при имплантации в объемные кристаллы КРТ [8—16]. При достижении дозы облучения $\Phi_{\text{sat}} = 10^{14}$ см⁻² слоевая концентрация достигает максимума $N_{S\text{max}} = (0,9—1) \cdot 10^{14}$ см⁻², происходит насыщение дозовой зависимости слоевой концентрации носителей заряда. Причем величина Φ_{sat} и значение $N_{S\text{max}}$ в области насыщения соответствуют значениям, полученным при имплантации ионов бора в объемный материал КРТ [15, 16]. В то же время для образцов эпитаксиальных пленок серий 2—4 эффекта насыщения дозовой зависимости N_S не наблюдается в пределах использованных доз облучения.

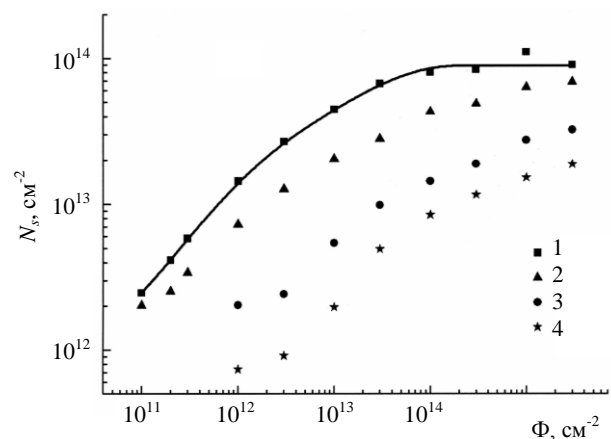


Рис. 2. Зависимость слоевой концентрации электронов N_S от дозы облучения Φ .

Энергия ионов бора $E = 100$ кэВ. Номер кривой соответствует номеру серии образца в таблице

Анализ поведения зависимости эффективной подвижности носителей заряда μ_{neff} от дозы облу-

чения показал, что для образцов серии 1 с увеличением дозы облучения наблюдается монотонное убывание зависимостей $\mu_{\text{неff}}(\Phi)$, а для образцов серий 2—4 — возрастание. Причем с увеличением дозы облучения различие между значениями $\mu_{\text{неff}}$ для образцов эпитаксиальных пленок разных серий уменьшается.

Различное поведение дозовых зависимостей электрофизических параметров для образцов различных серий можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, так как внедрение имплантата происходит в область материала, где состав для каждой эпитаксиальной пленки различается, то будет различаться и соотношение генерируемых первичных РД в металлических подрешетках CdTe и HgTe. Считается, что наблюдаемые изменения электрофизических свойств КРТ после различного рода радиационных воздействий обусловлены образованием дефектов на основе междоузельных атомов ртути, которые проявляют донорные свойства [8—14]. С помощью программного комплекса SRIM2003 был проведен расчет полного количества каскадов соударений, возникающих в эпитаксиальных пленках КРТ с переменным составом материала в области внедрения ионов бора, который показал, что для образцов серии 4 количество первичных смещений атомов ртути на 40 % меньше, чем для образцов серии 1. Так как количество генерируемых междоузельных атомов ртути уменьшается, то, соответственно, следует ожидать замедления динамики образования вторичных электрически активных дефектов, кинетика накопления которых пропорциональна концентрации первичных РД. Данный вывод подтверждается также анализом экспериментальных данных (см. рис. 2), который показывает, что вплоть до дозы облучения 10^{14} см^{-2} наблюдается почти линейное увеличение зависимости $N_S(\Phi)$, обусловленное возрастанием полной концентрации электронов в имплантированном слое. На рис. 3 представлена зависимость натурального логарифма скорости введения электрически активных РД $\ln(dN_S/d\Phi)$ от состава материала в области среднего проецированного пробега (R_p) ионов бора, которая удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией.

Второй возможной причиной того, что электрофизические параметры для образцов серии 1 и 4 отличаются, является различная толщина образующегося n^+ -слоя. Толщина n^+ -слоя главным образом определяется средним проецированным пробегом имплантируемых ионов и миграцией первичных РД в глубь облученного материала. Однако проведенный расчет с помощью программы SRIM2003 среднего проецированного пробега ионов бора в эпитаксиальных пленках КРТ с пе-

ременным составом в области внедрения имплантата показал, что величина R_p различается не более чем на 3 %. На миграцию первичных РД могут оказывать влияние градиент коэффициента диффузии дефектов и встроенное электрическое поле, возникающие в приповерхностной области материала вследствие наличия градиента состава эпитаксиальной пленки [17]. Для оценки их влияния необходимо проанализировать результаты измерений пространственного распределения объемной концентрации электронов $n(z)$ по глубине облученного материала, определяемого распределением электрически активных РД.

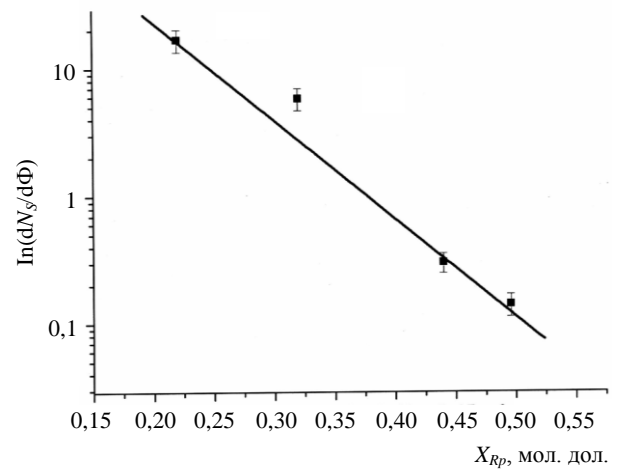


Рис. 3. Зависимость натурального логарифма скорости введения электрически активных РД $\ln(dN_S/d\Phi)$ от состава x эпитаксиальной пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в области среднего проецированного пробега R_p ионов бора

На рис. 4 представлены профили пространственного распределения объемной концентрации электронов $n(z)$ по глубине эпитаксиальных пленок серий 1 и 4, облученных ионами бора в диапазоне доз $10^{12}—10^{15} \text{ см}^{-2}$. Для образцов серии 1 наблюдается картина, которая широко описана в литературе по имплантации B^+ и других ионов в объемный материал КРТ [8—14]. В этом случае эпитаксиальный материал также имел однородное распределение состава по глубине. При дозе облучения 10^{12} см^{-2} максимально высокая концентрация электронов отмечается в области среднего проецированного пробега R_p ионов бора. Увеличение дозы облучения до $\Phi_{\text{sat}} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к возрастанию значения в максимуме профиля $n(z)$ вплоть до величины $n_{\text{sat}} = (2—3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к сдвигу профиля распределения электрически активных РД в глубь образца, при этом значение в максимуме зависимости $n(z)$ практически не изменяется, т. е. происходит насыщение концентрации электронов (см. рис. 4, а). Увеличение энергии имплантируемых ионов также приводит к сдвигу

профиля распределения $n(z)$ в глубь облученного материала, при этом значение объемной концентрации электронов в максимуме зависимости $n(z)$ составляет $n_{\text{sat}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и не зависит от энергии имплантанта.

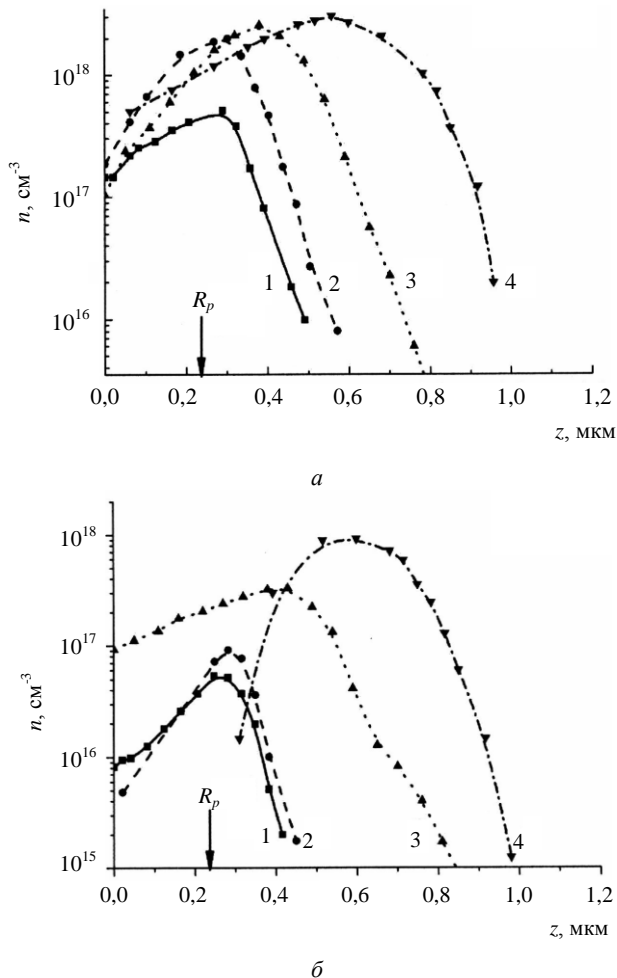


Рис. 4. Распределение объемной концентрации электронов n по глубине эпитаксиальной пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ образцов серий 1 (а) и 4 (б) после облучения ионами бора ($E = 100 \text{ кэВ}$).

Доза облучения (Φ , см^{-2}):
1 — 10^{12} ; 2 — 10^{13} ; 3 — 10^{14} ; 4 — 10^{15}

В случае же образцов эпитаксиальных пленок серии 4 с максимальным градиентом изменения состава по глубине области внедрения ионов динамика изменения профиля $n(z)$ с увеличением дозы облучения и энергии внедряемых ионов имеет существенное отличие. Значение в максимуме зависимости $n(z)$ непрерывно изменяется с увеличением дозы облучения и энергии имплантанта, а эффекта насыщения концентрации электронов не наблюдается. При этом для доз облучения $> 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит сдвиг профиля распределения электрически активных РД в глубь образца, хотя концентрация электронов в максимуме профиля еще не достигла величины n_{sat} (см. рис. 4, б).

Сравнение профилей распределения объемной концентрации электронов для образцов эпитаксиальных пленок различных серий, облученных ионами бора в диапазоне доз 10^{12} — 10^{15} см^{-2} и энергий 20—150 кэВ, показало, что величина концентрации электронов в максимуме профиля распределения $n(z)$ для всех исследуемых пленок различается. Причем значение концентрации тем меньше, чем больше состав эпитаксиальной пленки в области локализации профиля $n(z)$. Однако следует отметить, что максимум распределения $n(z)$ для всех зависимостей лежит на одной глубине. Кроме того, правый фронт профилей распределения $n(z)$ для образцов эпитаксиальных пленок различных серий имеет один и тот же наклон. Полученный результат позволяет сделать вывод, что дополнительные факторы, связанные с наличием градиента состава материала в приповерхностной области эпитаксиальной пленки, не оказывают определяющего влияния на процессы миграции первичных РД.

Исследование зависимости подвижности электронов μ_n от глубины облученного слоя для различных доз облучения показало, что наибольшее различие в значениях μ_n для эпитаксиальных пленок различных серий наблюдается в приповерхностной области материала при дозах облучения 10^{12} и 10^{13} см^{-2} . При повышении дозы облучения подвижность носителей заряда значительно отличается только в области внедрения ионов, а в районе локализации профиля $n(z)$ величина μ_n практически одинакова для образцов всех серий.

Измеряемые интегральные значения слоевой концентрации N_S и эффективной подвижности μ_{neff} носителей заряда определяются интегральными параметрами имплантированного слоя. Как показали измерения профилей $n(z)$ и $\mu_n(z)$ для различных доз облучения и энергии имплантанта, концентрация и подвижность носителей заряда в имплантированном слое образцов эпитаксиальных пленок различных серий зависит от локализации профиля пространственного распределения объемной концентрации электронов. Сравнение распределения состава материала и пространственного распределения объемной концентрации электронов по глубине эпитаксиальной пленки показывает, что прослеживается явная зависимость величины объемной концентрации и подвижности от состава эпитаксиальной пленки на глубине, где расположен максимум профиля распределения $n(z)$.

Считается, что эффект насыщения электрофизических характеристик облученного материала

КРТ обусловлен закреплением уровня Ферми в предельном состоянии F_{lim} , энергетическое положение которого с точностью до kT совпадает с уровнем вводимых радиационных дефектов E_R [8—14]. Энергетическое положение уровня E_R оценивается $\sim 0,15$ эВ выше дна зоны проводимости. Авторы [18] показали, что высокоэнергетическое облучение полупроводников группы алмаза и бинарных соединений группы $A^{III}B^V$ всегда, независимо от условий облучения и предыстории материала, приводит к закреплению уровня Ферми в предельном состоянии F_{lim} . Было также показано, что стационарное положение уровня Ферми в облученном полупроводнике совпадает с уровнем локальной электронейтральности кристалла $E_{|n|}$, положение которого может быть рассчитано теоретически. В работе [19] подобный подход к описанию свойств облученного материала был применен для узкозонных твердых растворов КРТ.

Сопоставление экспериментальных данных [8—14] и теоретического расчета [19] позволяет сделать предположение, что энергетическое положение уровня радиационных дефектов E_R совпадает с положением уровня локальной электронейтральности кристаллической решетки материала $E_{|n|}$ относительно дна зоны проводимости E_C . В рамках данного предположения был проведен расчет энергетического положения стационарного уровня Ферми F_{lim} и соответствующей ему предельной концентрации электронов n_{lim} в зависимости от состава КРТ. При расчете принимались во внимание результаты работы [19], а именно:

- энергетическое положение уровня локальной электронейтральности $E_{|n|}$ материала относительно уровня E_C имеет линейную зависимость от состава КРТ;
- для состава $x = 0,5$ энергетическое положение уровня $E_{|n|}$ совпадает с краем дна зоны проводимости ($E_{|n|} = E_C$);
- для состава $x = 0,2$ уровень $E_{|n|}$ находится на $0,15$ эВ выше дна зоны проводимости E_C , т. е. совпадает с энергетическим положением уровня вводимых РД E_R , определенным из экспериментальных данных [8—14].

Результаты расчета предельной концентрации электронов n_{lim} представлены на рис. 5, где также приведены экспериментальные значения максимальной концентрации электронов в области локализации профиля $n(z)$ в зависимости от состава эпитаксиальной пленки. Как видно, теоретическая кривая удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

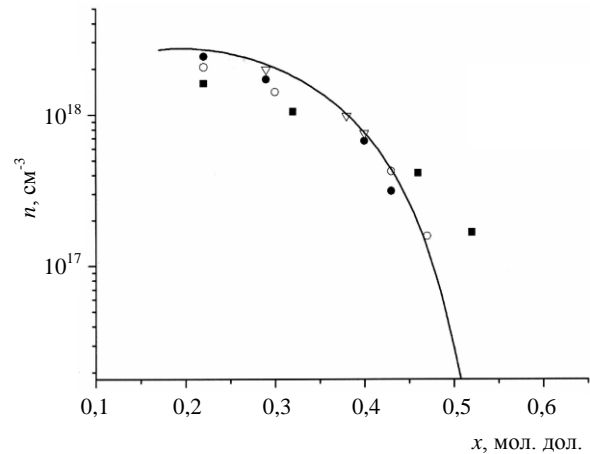


Рис. 5. Зависимость предельной концентрации электронов n_{lim} от состава x эпитаксиальной пленки $Cd_xHg_{1-x}Te$ (сплошная линия).

○ ● ▽ ■ (экспериментальные данные) — объемная концентрация электронов в максимуме их пространственного распределения в зависимости от состава материала в области локализации профиля $n(z)$

Заключение

Экспериментальные исследования влияния ионной имплантации на электрофизические параметры эпитаксиального материала, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, показали, что механизмы образования электрически активных РД и процесс их эволюции протекают сходным образом как в эпитаксиальных пленках, так и в объемном материале КРТ. Наблюдаемые отличия результатов ионной имплантации в эпитаксиальные пленки МЛЭ КРТ с переменным составом в области внедрения имплантанта и в объемный материал КРТ главным образом обусловлены различной динамикой накопления электрически активных РД и зависимостью электрофизических свойств материала от состава КРТ. Экспериментальные результаты показывают, что дополнительные факторы, связанные с наличием градиента состава в области внедрения имплантанта, не оказывают определяющего влияния на результирующее распределение электрически активных РД. Получено дополнительное экспериментальное подтверждение предположения того, что основными РД, определяющими свойства облученного КРТ, являются дефекты в металлической подрешетке HgTe.

На практике полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов ионной имплантации в МЛЭ КРТ с широкозонными варизонными слоями в приповерхностной области при изготовлении диодных структур.

Л и т е р а т у р а

1. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука. 2001. — 376 с.
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003. — 636 с.
3. Ryssel H., Lang G., Biersack J. P., Muller K., Kruger W.// IEEE Transaction on electron devices. 1980. V. ED-27. № 1. P. 58—62.
4. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Варавин В. С., Васильев В. В., Сусяков А. О., Овсяк В. Н.// Прикладная физика. 2000. № 5. С. 108—114.
5. Войцеховский А. В., Коханенко А. П.// Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 8. С. 44—49.
6. Войцеховский А. В., Денисов Ю. А., Коханенко А. П., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Ю. Г., Якушев Н. В.// Автометрия. — Новосибирск: Изд. СО РАН, 1998. № 4. С. 47—58.
7. Войцеховский А. В., Григорьев Д. В., Коротаев А. Г., Коханенко А. П., Леонтьев Д. В., Кульчицкий Н. А.// Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2004. Вып. 2. С. 60—65.
8. Voitsekhovskii A. V., Broudnyi V. N., Lilenko Yu. V., Krivov M. A., Petrov A. S.// International Journal "Solid State Communications". 1979. V. 31. № 26. P. 105—108.
9. Voitsekhovskii A. V., Lilenko Yu. V., Kokhanenko A. P., Petrov A. S.// Gordon and Breach Science Publishers Inc., Great Britain "Radiation Effects". 1982. V. 66. № 1—2. P. 7984.
10. Козырев С. П., Водопьянов Л. К.// ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 5. С. 893—899.
11. Bahir C., Kalish R.// J. Appl. Phys. 1983. V. 54. № 6. P. 3129—3140.
12. Destafanis G. L.// Nucl. Instr. Meth. 1983. V. 209/210. P. 567—580.
13. Bubulac L. O., Tennant W. E., Shin S. H., Wang C. C., Lanir M., Gerther E. R., Marshal E. D.// Japan Appl. Phys. 1980. V. 19. Suppl. 19-1. P. 495—500.
14. Войцеховский А. В., Коханенко А. П.// Изв. вузов. Физика. 1998. № 1. С. 101—116.
15. Пат. 2035801 РФ, С1, 6 Н 01 L 21/265/ Мищенко А. М., Талипов Н. Х., Шашкин В. В. 1995.
16. Пат. 2023326 РФ, С1, 5 Н 01 L 21/425/ Мищенко А. М., Талипов Н. Х., Шашкин В. В. 1994.
17. Vlasov A. P., Sokolovskii B. S., Monastyrskii L. S., Bonchuk O. Yu., Barcz F.// Thin Solid Films. 2004. V. 459. P. 28—31.
18. Brudnyi V. N., Grinyaev S. N., Stepanov V. E.// Physica B: Cond. Matter. 1995. V. 212. P. 429—435.
19. Брудный В. Н., Гриняев С. Н.// ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 7. С. 819—822.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

The boron implantation in the graded-gap MBE MCT epilayer

A. V. Voitsekhovskiy, D. V. Grigor'ev, A. G. Korotaev, A. P. Kokhanenko
Siberian Physical-Technical Institute, Tomsk, Russia

V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, Yu. G. Sidorov, N. N. Mikhailov
Institute of Semiconductors Physics, Novosibirsk, Russia

T. Kh. Talipov
ООО "Almazinvest", Moscow, Russia

In the paper experimental results on boron implantation of the $Cd_xHg_{1-x}Te$ epilayers with various composition near surface of the material are discussed. The electron concentration in the surface layer after irradiation vs irradiation dose and ion energy are investigated for range of doses 10^{11} — $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ and energies of 20—150 keV. Also the results of the electrical active defects distribution measurement, carried out by differential Hall method, after boron implantation are represented. Consideration of the received data shows, that composition gradient influence mainly on the various dynamics of accumulation of electric active radiation defects. The electric active defects distribution analysis shows, that the other factors are negligible.

УДК 621.383.4/5:621.375

Фотоприемное устройство с радиационно-охлаждаемым длинноволновым фоторезистором из КРТ

И. Д. Бурлаков, Г. Э. Поповян, Ю. С. Трошкин, Ю. П. Шаронов
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия