

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР $0.5 < T < 50$ К

Вертий А. А., Горбатюк И. Н., Иванченко И. В., Попенко Н. А.,
Пустыльник О. Д., Раренко И. М., Тарапов С. И.

Исследованы объемные и поверхностные характеристики твердых растворов $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.2$) в интервале температур $0.5 < T < 50$ К. Обсуждаются магнитопольевые зависимости постоянной Холла и магнитосопротивления в области перехода металл—диэлектрик для различных концентраций носителей в магнитных полях до 2.5 Т. Анализируются температурные зависимости концентрации n_s и подвижности μ_s электронов проводимости в приповерхностном слое на частоте $f = 130$ ГГц.

Введение. Изучению свойств твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) с составом $x = 0.2$ посвящен ряд работ как в нашей стране, так и за рубежом, что обусловлено прежде всего эффективностью их применения в качестве приемников ИК излучения. В связи с этим в последнее время особое внимание было уделено области аномального поведения кинетических коэффициентов в КРТ, связанного с переходом металл—диэлектрик и обусловленного локализацией электронов в ямах флуктуационного потенциала (ФП) примесных атомов [¹⁻⁴]. Эти работы и целый ряд других фундаментальных исследований позволили получить достаточно полное представление о структуре этого соединения, о механизмах переноса энергии и рассеяния основных и неосновных носителей в объеме кристалла и т. д. Однако, как известно, в КРТ существуют по крайней мере две проблемы, изучению которых не было уделено достаточно внимания: во-первых, отсутствует совместный анализ поверхностных и объемных кинетических свойств кристаллов в их взаимосвязи, во-вторых, интервал температурных измерений ограничивался, как правило, со стороны низких температур величиной $T = 1.5$ К.

Цель настоящей работы — совместное исследование поведения объемных и поверхностных кинетических коэффициентов твердых растворов КРТ n -типа в области низких и сверхнизких температур $0.5 < T < 50$ К.

Методика измерений

Исследования проводились на низкотемпературном комплексе «Буран», обеспечивающем рабочий интервал температур $0.3 < T < 50$ К и диапазон магнитных полей до 7 Т [⁵]. Измерение объемных характеристик полупроводниковых образцов осуществлялось гальваномангнитными методами на постоянном токе [⁶]. Поверхность и концентрация носителей на поверхности определялись из спектров поверхностных поляритонов магнитоплазменного типа [⁷]. Возбуждение последних происходило с помощью призмы полного внутреннего отражения.

Изучались образцы КРТ n -типа, выращенные модифицированным методом зонной плавки под углом к горизонту в кварцевых контейнерах из предварительно синтезированных однородных поликристаллов.

Образцы требуемой конфигурации вырезались из кристаллических шайб толщиной $0.8 + 1.1$ мм, перевод которых в n -тип проводимости осуществлялся

Таблица 1

| № образца | Тип образца | Состав x | n , см ⁻³ при $T = 77$ К | μ , см ² /В·с при $T = 77$ К | Ширина щели E_g , мэВ | N_D/N_A | Время жизни избыточных фотонов |
|-----------|-------------|------------|--|--|-------------------------|-----------|--------------------------------|
| 1 | КРТ | 0.219 | $1.5 \cdot 10^{14}$ | $2.27 \cdot 10^5$ | 120 | 0.5 | $5.6 \cdot 10^{-7}$ |
| 2 | КРТ | 0.201 | $2.7 \cdot 10^{14}$ | $3.22 \cdot 10^5$ | 95 | 0.6 | $5.0 \cdot 10^{-7}$ |
| 3 | КРТ | 0.202 | $3.9 \cdot 10^{14}$ | $3.5 \cdot 10^5$ | 95 | 0.6 | $4.8 \cdot 10^{-7}$ |
| 4 | КРТ | 0.204 | $6.0 \cdot 10^{14}$ | $2.6 \cdot 10^5$ | 100 | 0.7 | $6.1 \cdot 10^{-7}$ |

обычным низкотемпературным отжигом в насыщенных парах ртути. Особое внимание было уделено подготовке поверхности кристаллов с целью устранения как нарушенных слоев в кристаллах при механической обработке, так и уменьшения переходного по свойствам приповерхностного слоя путем оптимизации и стабилизации химических свойств поверхности кристаллов. Механическая обработка образцов осуществлялась в щадящем режиме полировкой алмазными пастами с финишной обработкой на АСМ 1/0 и последующим снятием остаточного нарушенного слоя толщиной не менее $20 + 40$ мкм химическим травлением в стандартном химическом травителе Br_2 в метаноле. С целью оптимизации свойств поверхности и максимального устранения влияния вида обработки на ее свойства исследованы различные виды обработок: механическая полировка, химико-механическая полировка и химическое травление при различных режимах на свойства поверхности кристаллов. Контроль состояния поверхности после обработки (по величине естественного окисного слоя, влиянию переходной по химическому составу области и высоте рельефа) производился методами оже-спектроскопии, растровой электронной спектроскопии (РЭМ), методом профилометрии и химическим микроанализом, что позволило оптимизировать свойства поверхности, устранив влияние различных видов обработок и получив химико-физические параметры поверхности кристаллов (толщина окисного слоя < 60 Å, высота рельефа < 1 мкм) практически идентичными по свойствам их естественным слоям.

Характеристики образцов, полученные при температуре кипения азота, приведены в табл. 1. Степень компенсации оценивалась из нахождения двух величин: $N_D - N_A$ определялась по значению коэффициента Холла в области примесной проводимости, где $R_x(T) = \text{const}$; $N_D + N_A$ рассчитывалась по формуле Брукса—Херринга по значению измеренной подвижности также в области примесной проводимости.

Обсуждение экспериментальных результатов

На рис. 1 приведены температурные зависимости коэффициентов Холла R_x и холловской подвижности μ_x для четырех образцов КРТ (табл. 1).

Наблюдается характерный оптимум на зависимостях $\mu_x(T)$, свидетельствующий о смене механизмов рассеяния основных носителей, т. е. о переходе от примесной проводимости к собственной. При этом положение данного оптимума зависит от величины концентрации последних. В соответствии с классическими представлениями о поведении $R_x(T)$ следовало бы ожидать отсутствия его изменения в области температур $T < 10$ К, где вступает в действие механизм примесной проводимости. Однако для образцов $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в ряде работ, например [1, 3], было показано anomальное изменение R_x при изменении величины магнитного поля. Ввиду малого значения магнитного поля $H_0 = 500$ Э, при котором регистрировался R_x в наших экспериментах, наблюдение аномалий может иметь место для образцов с малыми концентрациями [3]. Действительно, для образцов 3, 4 изменения R_x не наблюдается вплоть до $T = 0.5$ К. Для образцов 1, 2 происходит anomальное изменение в поведении $R_x(T)$ при температуре $T < 1$ К.

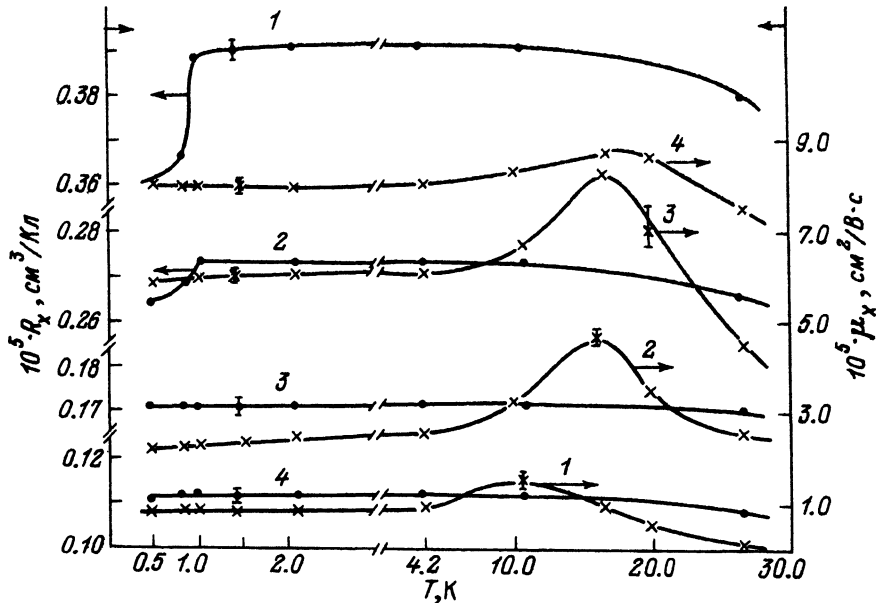


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла и холловской подвижности. Цифры у кривых соответствуют номерам образцов.

По-видимому, в данной области температур при концентрации носителей $n = 1.5 \cdot 10^{14}$ и магнитных полях $H_0 = 500$ Э природа аномалии может быть связана с переходом металл—диэлектрик [3]. С целью проверки данного предположения нами были измерены магнитопольные зависимости $R_X(H)$ и поперечного магнитосопротивления $\rho_{xx}(H)$ для образцов 1 и 3 (рис. 2, 3). Рассмотрев полученные зависимости, видим, что после некоторого критического значения магнитного поля $H_{кр}$ наблюдаются изломы в поведении $R_X(H)$ и $\rho_{xx}(H)$. При этом крутизна спада зависимости $R_X(H)$ уменьшается с ростом T , что свидетельствует о доминирующем эффекте уменьшения концентрации легких электронов над эффектом их ларморовского закручивания. Этот результат согласуется с данными работы [8], где аналогичные зависимости наблюдались до $T = 1.4$ К. Как следует из зависимостей, приведенных на рис. 2, крутизна спада максимальна для температуры 0.5 К и для образца 1 с минимальной концентрацией носителей.

Оценим величины порогового поля $H_{кр}$ для образцов 1 и 3 из соотношения

$$B = \frac{3\pi^2 \hbar c a^{1/2} n^{7/6}}{2en_i^{1/3}} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/6}, \quad (1)$$

где n_i — концентрация заряженных центров, a — боровский радиус электрона. Согласно (1), значения $H_{кр}$ для образцов 1 и 3 составляют 0.5 и 2.8 кЭ соответственно. Сравнение рассчитанных величин с полученными в результате эксперимента свидетельствует о наличии перехода «металл—диэлектрик» в исследуемых образцах, обусловленного локализацией электронов в ямах флуктуационного потенциала.

Отметим также аномальное поведение коэффициента Холла $R_X(H)$ при магнитных полях $H < 2$ кЭ и температурах $T < 1$ К (см. вставку на рис. 2). Амплитуда осцилляций $R_X(H)$ максимальна для образца с минимальной кон-

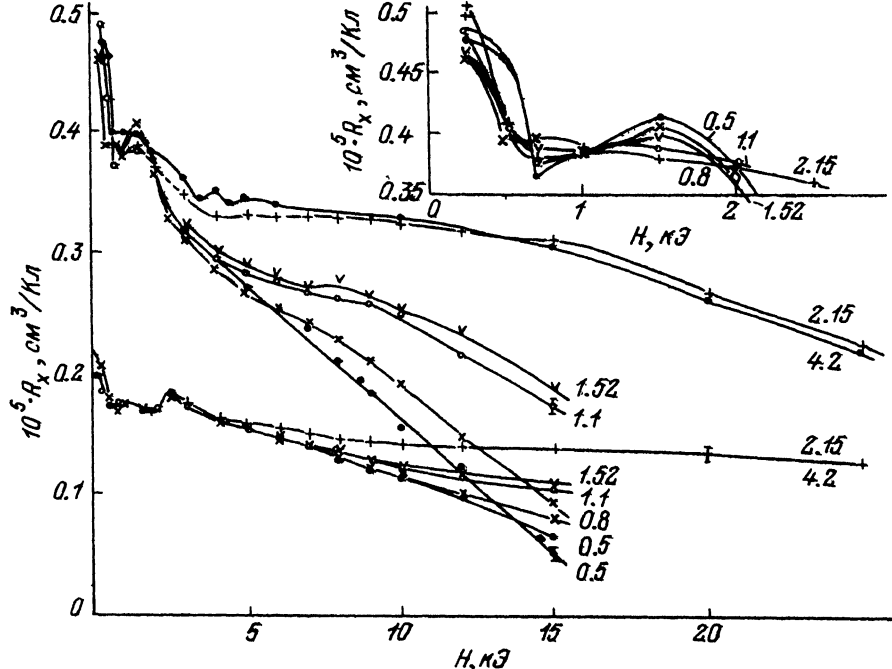


Рис. 2. Полевые зависимости коэффициента Холла для образцов 1 и 3.
Цифры у кривых соответствуют температуре измерений (К).

центрацией основных носителей заряда. Обнаруженный эффект будет являться предметом дальнейших исследований.

Сравнительный анализ полученных температурных и магнитополевых зависимостей основных параметров кристаллов $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ показывает, что для всех исследованных образцов концентрация носителей заряда на поверхности n_s , определенная методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), выше, а подвижность электронов на поверхности μ_s ниже или равна холловской (табл. 2, $T = 4.2$ К).

Указанный результат свидетельствует о различии свойств объема и поверхности кристаллов КРТ и объясняется особенностью образования дефектов в приповерхностном слое при их обработке [9]. Полученное методом НПВО значение величин концентрации электронов может быть объяснено наличием у полупроводников n -типа донорных состояний на поверхности, что приводит к изгибу энергетических зон $E(k)$ в приповерхностной области и образованию области обогащения. При этом диффузионное рассеяние носителей заряда на поверхности обуславливает уменьшение их подвижности [10].

Таблица 2

| № образца | $n_x, \text{см}^{-3}$ | $\mu_x, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ | $n_s, \text{см}^{-3}$ | $\mu_s, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ | $H_{\text{кр}}^T$ | $H_{\text{кр}}^3$ |
|-----------|-----------------------|--|-----------------------|--|-------------------|-------------------|
| 1 | $1.6 \cdot 10^{14}$ | $2.5 \cdot 10^5$ | $2.57 \cdot 10^{14}$ | $1.95 \cdot 10^5$ | 0.5 | 1.5 |
| 2 | $2.30 \cdot 10^{14}$ | $6.2 \cdot 10^5$ | $3.0 \cdot 10^{14}$ | $2.98 \cdot 10^5$ | 1.2 | — |
| 3 | $3.65 \cdot 10^{14}$ | $8.0 \cdot 10^5$ | $4.9 \cdot 10^{14}$ | $2.05 \cdot 10^5$ | 2.8 | 3.5 |
| 4 | $5.6 \cdot 10^{14}$ | $1.65 \cdot 10^5$ | $5.1 \cdot 10^{14}$ | $1.65 \cdot 10^5$ | — | — |

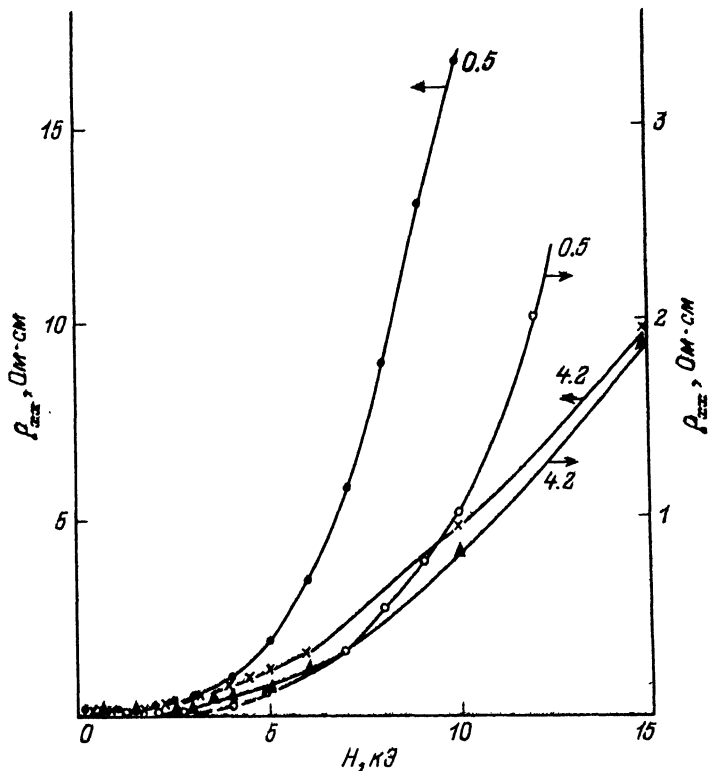


Рис. 3. Зависимость магнитосопротивления от магнитного поля для образцов 1 (шкала слева) и 3 (шкала справа).

Цифры у кривых соответствуют температуре измерений.

При возбуждении поверхностного поляритона магнитоплазменного типа в методе НПВО характерные значения магнитного поля, соответствующего порогу возбуждения, составляли $1.5 + 2.2$ кЭ для образцов 1—3. Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что для образца 1 порог возбуждения поляритона соответствует магнитному полю, превышающему $H_{кр}$, т. е. после перехода от металлической к активационной проводимости. По-видимому, именно этим фактом объясняется незначительное уменьшение подвижности на поверхности μ_s по сравнению с образцами 2 и 3 в связи с тем, что в поле СВЧ волны электроны, находящиеся в ямах ФП (пространственный размер которых больше области локализации на отдельных центрах), ведут себя как «свободные» и вносят вклад в высокочастотную проводимость.

На рис. 4 приведены температурные зависимости концентрации и подвижности носителей заряда на поверхности полупроводника, измеренные методом НПВО. Видно, что характер этих зависимостей отличается от аналогичных, измеренных в объеме кристалла. В частности, на концентрационной зависимости $n_s(T)$ наблюдается минимум, который с ростом концентрации основных носителей (образцы 2 и 3) сдвигается в область высоких температур. Для объяснения полученной температурной зависимости поверхностной концентрации применим следующую физическую модель. Известно, что поверхностная концентрация электронов n_s связана с объемной концентрацией электронов n_i , электростатическим потенциалом на поверхности ψ_s и температурой следующим соотношением [10]:

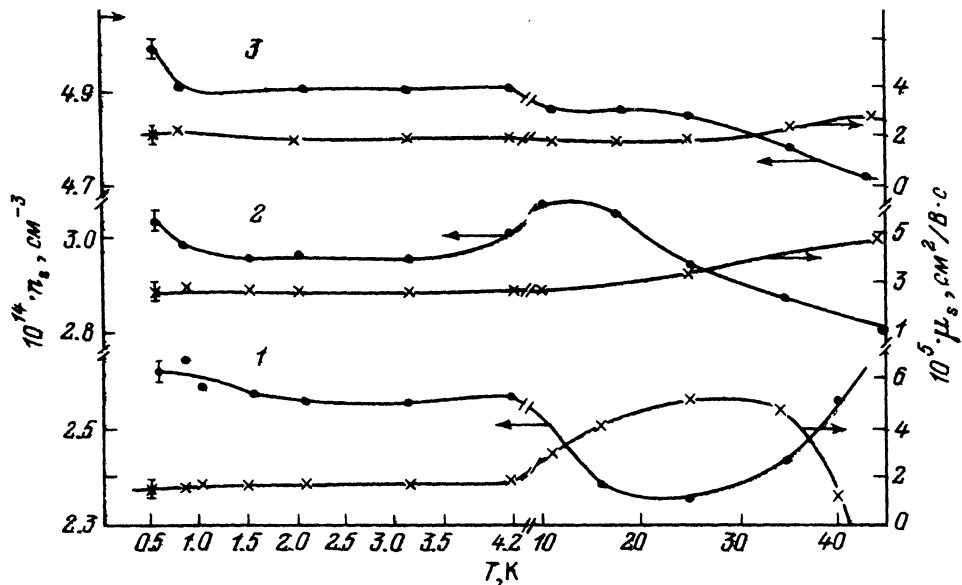


Рис. 4. Температурные зависимости концентрации и подвижности на поверхности полупроводника. Цифры у кривых соответствуют номерам образцов.

$$n_s = n_i e^{\psi_s/kT}. \quad (2)$$

Как следует из предыдущих результатов, ψ_s в нашем случае из-за образования обогащенного слоя положителен. В области примесной проводимости до температуры порядка $T < 10$ К концентрация n_i постоянна. Наблюдаемое уменьшение концентрации на поверхности в области $T > 10$ К связано с температурным изменением величины заряда в приповерхностной области. При дальнейшем увеличении температуры это уменьшение n_s будет компенсироваться ростом n_i , связанным с переходом к собственной проводимости. По мере увеличения концентрации n_x (рис. 1) от образца к образцу скорость роста n_i как функции температуры уменьшается, что и приводит к сдвигу минимума в области более высоких температур. Обращает на себя внимание наблюдаемая на рис. 1, 4 тенденция роста концентрации при $T < 1$ К, причем характер роста различен для объема и поверхности и зависит от концентрации основных носителей в исследуемом образце. При этом сложный вид кривой $n_s(T)$ для поверхности образца 2 (рис. 4), по всей видимости, обусловлен тем обстоятельством, что данная зависимость регистрировалась при значении магнитного поля (соответствующего условию возбуждения поверхностного поляритона) в области перехода металл—диэлектрик (табл. 2).

В данной работе проведены исследования поверхностных и объемных кинетических характеристик тройных соединений типа $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и предпринята попытка их совместного анализа. Было установлено следующее.

1. Для всех исследованных образцов концентрация носителей на поверхности выше, а подвижность ниже или такая же, как в объеме кристаллов.
2. Наличие экстремума в зависимости $n_s(T)$ обусловлено изменением величины заряда в приповерхностном слое при повышении температуры.
3. Максимальное значение $\mu_s(T)$ сдвигается в область более высоких температур по сравнению с $\mu_x(T)$ по мере увеличения n .
4. Поверхностная подвижность носителей различна в области металлической и активационной проводимостей.

5. Увеличение концентрации носителей при $T < 1$ К зависит от концентрации примесей в кристаллах КРТ, при этом характер роста n на поверхности и в объеме образца различен.

Обнаружен осцилляционный характер магнитополевой зависимости коэффициента Холла в интервале магнитных полей $0.1 < H < 1$ кЭ, причем амплитуда осцилляций растет как по мере уменьшения концентрации n , так и при понижении температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аронзон Б. А., Чумаков Н. К. // ФТТ. 1989. Т. 31. В. 4. С. 10—20.
- [2] Аронзон Б. А., Копылов А. В., Мейлихов Е. З. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 471—477.
- [3] Цидильковский И. М., Арапов Ю. Г., Давыдов А. Б., Зверева М. Л. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 5. С. 792—797.
- [4] Shayegan M., Goldman V. T., Dvew H. D. // Phys. Rev. B. 1988. V. 39. N 8. P. 5585—5602.
- [5] Vertiy A. A., Ivanchenko J. V., Popenko V. A. et al. // Int. J. Infr. a. Millimeter waves. 1989. V. 10. N 3. P. 395—404.
- [6] Кучис Е. В. Методы исследования эффекта Холла. М., 1974. 328 с.
- [7] Амбразявичене В. С., Бразис Р. С. // ФТТ. 1977. Т. 12. В. 6. С. 1114—1118.
- [8] Арапов Ю. Г., Давыдов А. Б., Зверева М. Л. и др. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1392—1396.
- [9] Гайдялис В. И., Кушпелис А. А., Рашевская Е. П. // Тр. VI Всес. симп. по полупроводникам с узкой запрещенной зоной и полуметаллам. Львов, 1983. С. 90.
- [10] Пустыльник О. Д., Зыков Г. А., Раренко И. М. и др. // Тр. II Всес. конф. материаловедения халькогенидных и кислородосодержащих полупроводников. Черновцы, 1986. Т. 1. С. 118.
- [11] Шалимова К. В. Физика полупроводников. М., 1976. 416 с.

Институт радиофизики и электроники
АН Украины
Харьков

Получена 4.02.1991

Принята к печати 22.10.1991