

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛОВУШЕК В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ] ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Козловский В. В., Кольченко Т. И., Ломако В. М.

С помощью измерений емкостной спектроскопии в GaAs с  $n_0 = 10^{15} - 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  исследовалось влияние температуры облучения  $\Theta$  на эффективность введения электронных ловушек в интервале  $20 \leq \Theta \leq 550 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Установлено, что при  $\Theta \geq 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , когда  $E$ -ловушки термически нестабильны, основной вклад в изменение свойств материала вносят ловушки  $X1$  и  $X2$  с  $E_a \approx 0.38$  и  $E_a = 0.76$  эВ соответственно. Изменений энергетического спектра  $X$ -ловушек в зависимости от метода выращивания материала (эпитаксиальный, Чохральского), уровня его легирования и типа легирующей донорной примеси (S, Te) не наблюдалось.

Показано, что в интервале  $\Theta = 20 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$  эффективность введения ловушки  $X2$  практически не меняется, а эффективность введения  $X1$  существенно зависит от величины  $\Theta$ . Предполагается, что рост скорости введения  $X1$ , наблюдаемый в нелегированных слоях [ $n_0 \approx (1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ] при  $\Theta = 300 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , обусловлен изменением зарядового состояния дефекта, а последующий спад при более высоких  $\Theta$  — отжигом центра. Указывается на возможную связь ловушки  $X1$  с одним из зарядовых состояний вакансии As.

Дефекты, вводимые в  $n$ -GaAs в результате облучения электронами с  $E = 1$  мэВ при температуре  $\Theta \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , изучались с помощью различных методов, и к настоящему времени в литературе накоплена обширная информация по этому вопросу [1-4]. В то же время по результатам высокотемпературного облучения ( $\Theta > 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) имеются лишь единичные сообщения [5-8].

В настоящей работе с помощью измерений нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) проведены исследования влияния температуры облучения на эффективность введения электронных ловушек в широком интервале температур ( $\Theta = 20 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Проанализировано поведение как  $E$ -ловушек, стабильных лишь до  $T \approx 230 \text{ }^\circ\text{C}$ , так и малоизученных центров, обладающих более высокой термической стабильностью. Использовались нелегированные [ $n_0 = (1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ] и легированные серой ( $n_0 \sim 2.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) слои GaAs, выращенные хлоридным методом на сильно легированных подложках, а также легированные теллуром ( $n_0 \sim 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) объемные кристаллы GaAs, полученные методом Чохральского. Перед облучением на поверхности образцов были сформированы барьеры Шоттки. Дефекты вводились путем импульсного облучения электронами с  $E = 0.9$  мэВ, частота следования импульсов составляла 450 Гц, длительность импульса 370 мкс. Для разделения вкладов  $E$ -ловушек и дефектов, обладающих более высокой термической стабильностью, образцы GaAs, облученные при  $\Theta = 20 - 260 \text{ }^\circ\text{C}$ , подвергались впоследствии термическому отжигу при  $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 15 мин.

Типичный спектр НЕСГУ исходных структур с  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  представлен на рис. 1 (кривая 1). Он включает в себя электронные ловушки  $N1 - N4$ , характеризующиеся значениями энергии активации термоэмиссии ( $E_a$ ), равными 0.18, 0.43, 0.62 и 0.76 эВ соответственно. Здесь же даны типичные спектры структур, облученных при  $\Theta = 20 - 200$  и  $300 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Установлено, что в первом случае в результате облучения преимущественно вводятся известные электронные ловушки  $E2 - E4$  и  $E8$  [2], а во втором — ловушки  $X1$  и  $X2$ , характеризующиеся

значениями  $E_a \approx 0.38$  и  $0.76$  эВ соответственно. Контрольные измерения показали, что появление пика  $X3$  ( $E_a \approx 0.8$  эВ, кривая 4) обусловлено термической обработкой структур [8]. На кривых 2 и 3 видно, что ловушка  $X2$  вводится не только в результате облучения при высоких температурах ( $\Theta > 300$  °C), но также и при  $\Theta = 20-200$  °C, когда преобладают  $E$ -ловушки. Присутствие  $X1$  в образцах, облученных при  $\Theta = 20-250$  °C, становится очевидным лишь после отжига при  $T = 300$  °C, приводящего к исчезновению  $E$ -ловушек, следо-

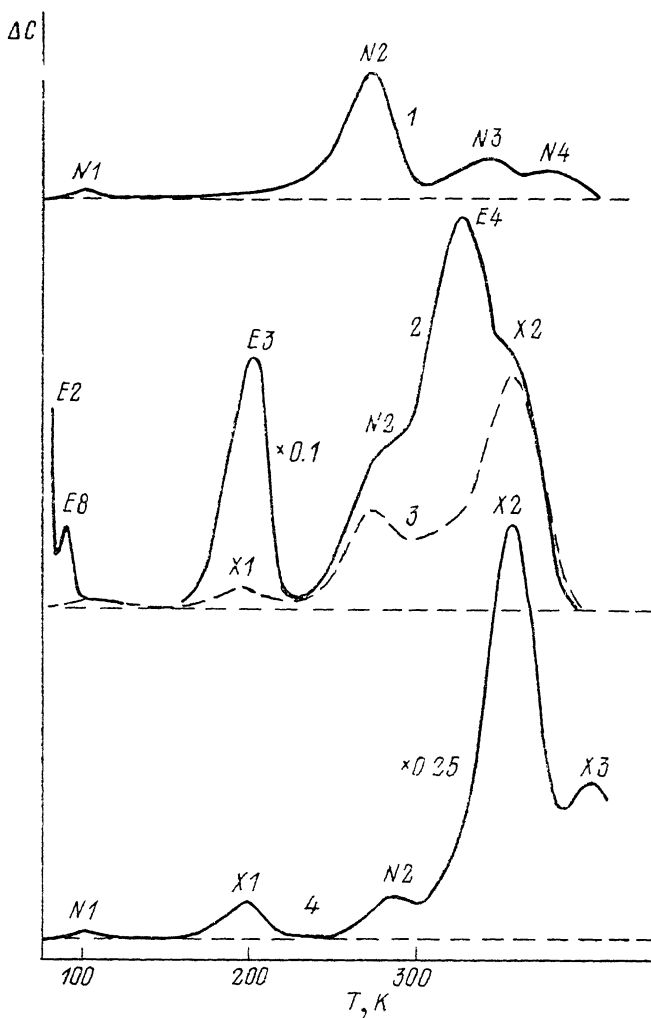


Рис. 1. Типичные спектры НЕСГУ исходных (1) и облученных электронами при различных температурах  $\Theta$  структур GaAs после облучения (2, 4) и отжига при  $T = 300$  °C ( $\Delta t = 10$  мин) (3).

$\Theta$ , °C: 2, 3 — 200; 4 — 500,  $e_n^{-1} = 1.31 \cdot 10^{-2}$  с,  $\Delta t_3 = 0.01$  с.

вательно, вопрос о введении  $X1$  непосредственно в результате облучения при  $\Theta = 20-250$  °C остается открытым.

Анализ показал, что в сильно легированных слоях GaAs центры  $X1$  и  $X2$  являются основными электронными ловушками, вводимыми в результате высокотемпературного облучения ( $\Theta = 200-400$  °C). Изменений энергетического спектра  $X$ -ловушек в зависимости от метода выращивания материала, уровня его легирования и типа легирующей донорной примеси (S, Te) не наблюдалось.

Представляло интерес выяснить влияние температуры облучения на эффективность введения электронных ловушек. На рис. 2 показано, как меняются скорости введения ( $dN_T/d\Phi$ )  $E$ - и  $X$ -ловушек в зависимости от температуры облучения для структуры с  $n_0 \approx 10^{15}$  см $^{-3}$ . Видно, что при  $\Theta > 200$  °C скорости

введения  $E$ -ловушек резко уменьшаются. Сравнение этих данных с результатами [9] показывает, что зависимости  $dN_T/d\Phi=f(\Theta)$  сходны с кривыми изохронного отжига соответствующих центров, введенных в результате облучения при  $\Theta=20^\circ\text{C}$  (см. вставку на рис. 2). Некоторый сдвиг кривых  $dN_T/d\Phi=f(\Theta)$  в сторону высоких температур относительно кривых отжига, по-видимому, обусловлен различием уровней легирования структур и длительностей

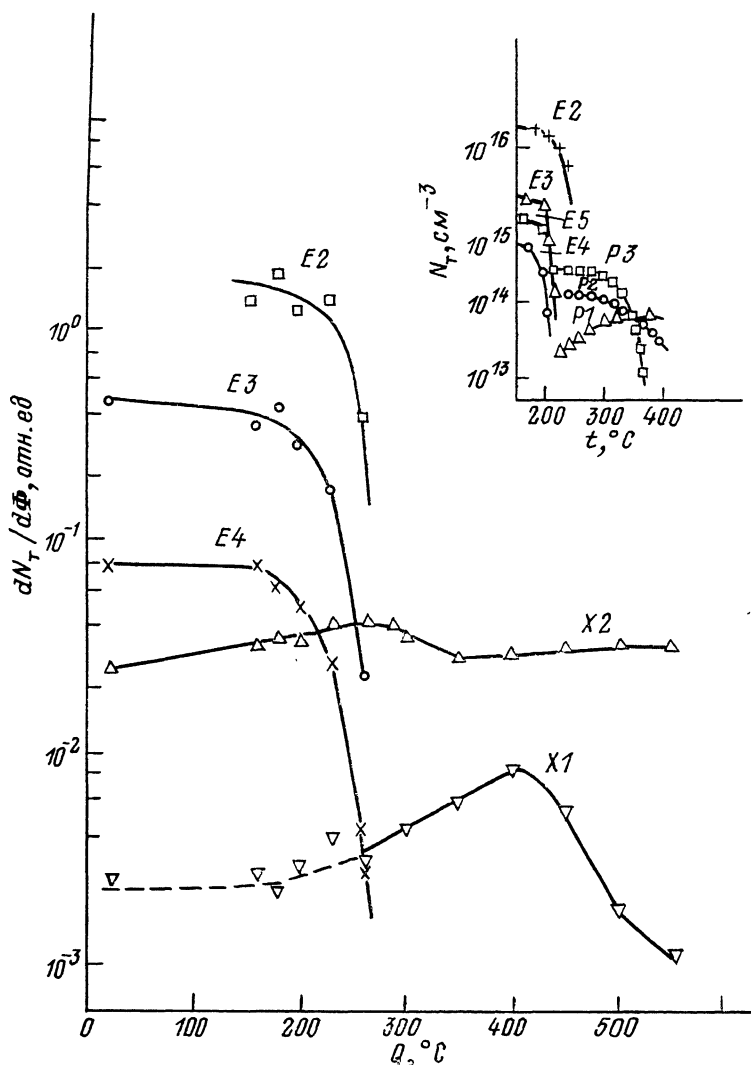


Рис. 2. Эффективности введения  $E$ - и  $X$ -ловушек в GaAs с  $n_0=10^{15}\text{ см}^{-3}$  в зависимости от температуры облучения.

На вставке показаны кривые изохронного отжига электронных ловушек в  $n$ -GaAs, облученном электронами при  $\Theta=20^\circ\text{C}$  [9].

процессов облучения и отжига, составляющих 2—3 и 10 мин соответственно. Таким образом, наблюдаемое в интервале  $\Theta=200\text{—}300^\circ\text{C}$  снижение эффективности введения  $E$ -ловушек, очевидно, обусловлено термической нестабильностью указанных дефектов при  $T\geq 200^\circ\text{C}$ . Относительный вклад  $X$ -ловушек в интервале  $200 < \Theta < 550^\circ\text{C}$ , напротив, возрастает.

Данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что эффективности введения центров  $X1$  и  $X2$  по-разному зависят от  $\Theta$ . Это, по-видимому, указывает на принадлежность соответствующих пиков в спектре дефектам различной природы. Результаты [9] свидетельствуют о том, что в облученных при  $\Theta=20^\circ\text{C}$  образцах GaAs после отжига при  $T=270^\circ\text{C}$  присутствуют ловушки  $P1\text{—}P3$ . Сопоставление параметров термоэмиссии указывает на то, что центр

$X1$ , по-видимому, близок к  $P1$ , а  $X2$  — к  $P3$ . Из-за наличия ловушек  $N2$  и  $N3$  в исходном материале возможный вклад ловушки  $P2$  в спектре выделить не удалось. Из рис. 2 видно, что зависимости  $dN_T/d\Phi=f(\Theta)$  для  $X$ -ловушек и поведение концентраций соответствующих  $P$ -ловушек в ходе изохронного отжига заметно различаются. Так, эффективность введения ловушки  $X2$  в интервале  $\Theta \approx 20-550^\circ\text{C}$  практически постоянна. На концентрацию этого центра почти не влияет и эффективный отжиг  $E$ -ловушек в процессе облучения при  $\Theta=200-300^\circ\text{C}$ . В то же время, по данным [9], отжиг ловушки  $P3$  наблюдается при  $T=300-370^\circ\text{C}$ . Эта особенность поведения ловушки  $X2$  по отношению к поведению  $P3$  при отжиге остается пока неясной. Не исключено, что пик  $X2$  в спектре НЕСГУ является составным, и центру  $P3$  соответствует лишь часть этого пика.

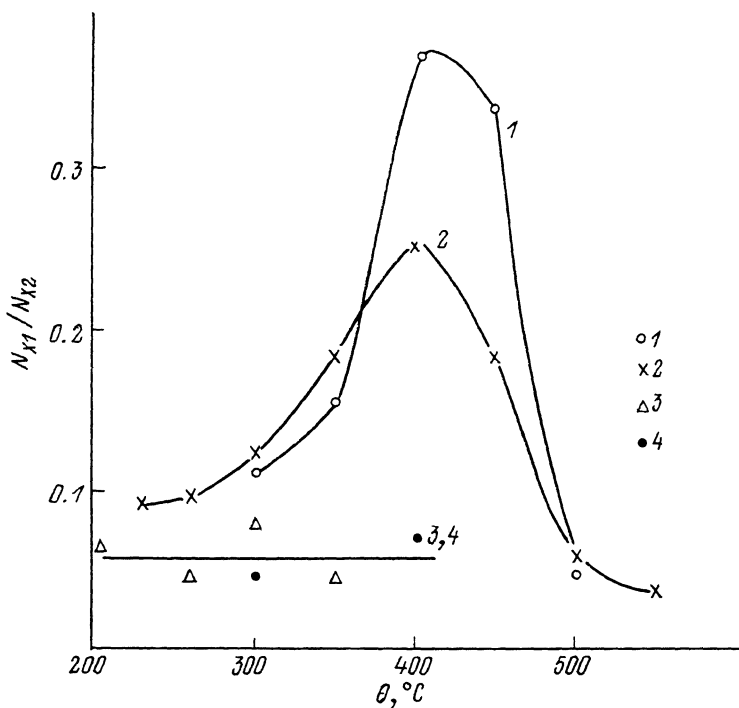


Рис. 3. Отношение концентраций центров  $X1$  и  $X2$  в зависимости от температуры облучения  $\Theta$  для различных типов структур.

$n_0$ ,  $\text{см}^{-3}$ : 1 —  $10^{15}$  (нелегированный); 2 —  $2 \cdot 10^{15}$  (нелегированный); 3 —  $2.5 \cdot 10^{17}$  (S); 4 —  $2.5 \cdot 10^{17}$  (Te).

Особо следует остановиться на зависимости  $dN_T/d\Phi=f(\Theta)$  для центра  $X1$ . Ранее отмечалось, что вопрос о возможности введения этой ловушки непосредственно в результате облучения при  $\Theta \leq 250^\circ\text{C}$  остается нерешенным, и приведенные на рис. 2 экспериментальные точки по эффективности введения  $X1$  в интервале  $\Theta=20-300^\circ\text{C}$  соответствуют значениям, полученным после отжига облученных структур при  $T=300^\circ\text{C}$ . Из рис. 2 видно также, что в интервале  $\Theta=300-400^\circ\text{C}$  наблюдается заметный рост скорости введения  $X1$ , а при дальнейшем повышении температуры облучения эффективность введения этой ловушки уменьшается. В то же время рост концентрации центра  $P1$  наблюдался в ходе отжига при более низких температурах ( $T=230-300^\circ\text{C}$ ), что позволило авторам [9] связать процесс формирования этого дефекта с отжигом  $E$ -ловушек. С целью получения дополнительной информации о поведении центра  $X1$  были проанализированы зависимости  $dN_T/d\Phi=f(\Theta)$  для других типов структур. Результаты измерений представлены на рис. 3 в виде отношения концентраций центров  $X1$  и  $X2$  в зависимости от температуры облучения. [Наблюдаемые изменения  $N_{X1}/N_{X2}=f(\Theta)$  в первую очередь отражают поведение  $dN_{X1}/d\Phi=f(\Theta)$ , поскольку  $dN_{X2}/d\Phi$  слабо зависит от  $\Theta$  (рис. 2)]. Видно, что рост  $N_{X1}/N_{X2}$

устойчиво воспроизводится для нелегированных слоев [ $n_0 \sim (1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ], но практически отсутствует в случае облучения сильно легированных материалов при  $\Theta \leq 400^\circ \text{C}$ . Анализ положения уровня Ферми ( $E_F$ ) в зависимости от температуры облучения показывает, что для нелегированных эпитаксиальных слоев в интервале  $\Theta = 350-380^\circ \text{C}$   $E_F$  расположен вблизи энергетического положения ловушки  $XI$ , т. е. в области  $\Theta = 300-400^\circ \text{C}$ , возможно, происходит изменение зарядового состояния первичного дефекта, входящего в состав указанного центра. В сильно легированных материалах  $E_F$  лежит значительно выше указанного уровня, и во всем исследованном интервале  $\Theta$  перезарядки дефекта не наблюдается (рис. 4). Таким образом, приходим к заключению, что рост эффективности введения  $XI$ , возможно, обусловлен изменением зарядового состояния первичного дефекта, входящего в состав центра  $XI$ .

Из рис. 3 следует, что при  $\Theta > 400^\circ \text{C}$  эффективность введения  $XI$  уменьшается, что, вероятно, связано с конкурирующим процессом отжига. Анализ

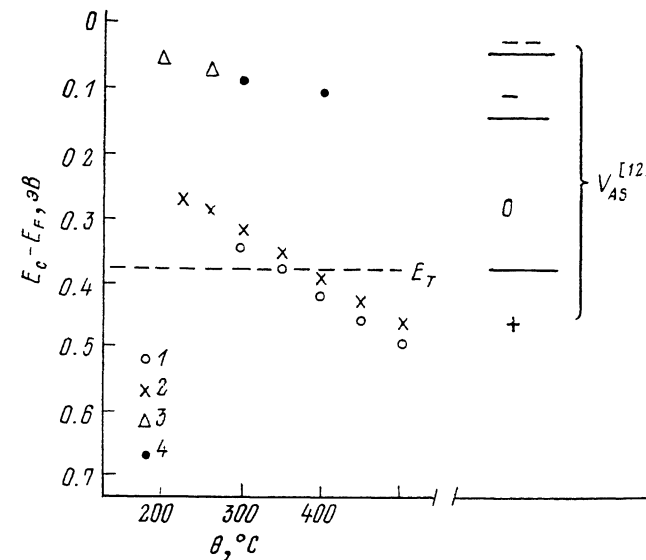


Рис. 4. Зависимость положения уровня Ферми от температуры облучения для различных типов структур.

Обозначения те же, что и на рис. 3. Здесь же дан энергетический спектр  $V_{As}$  в соответствии с [12]

литературных данных [3, 10, 11] показывает, что в облученном GaAs в области  $T > 400^\circ \text{C}$  происходят процессы перестройки и отжига ряда радиационных дефектов. Так, по данным ЭПР [3] в облученном электронами ( $E_e = 1 \text{ мэВ}$ ,  $\Phi \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) полуизолирующем материале основная масса вакансий мышьяка ( $V_{As}$ ) отжигается при  $T = 450^\circ \text{C}$ . Этот результат согласуется с данными по отжигу  $V_{As}$ , полученными авторами [10] при исследовании аннигиляции позитронов в образцах сильно легированного GaAs, облученного электронами ( $E_e = 1 \text{ мэВ}$ ,  $\Phi \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ). По данным оптического поглощения, в ходе изохронного отжига облученного быстрыми нейтронами  $n\text{-GaAs} : \text{Si}$  в интервале  $T = 400-500^\circ \text{C}$  наблюдалась перестройка  $\text{Si}_{\text{Ga}} \rightarrow \text{Si}_{\text{As}}$ , которая тоже, по-видимому, требует участия  $V_{As}$  ( $\text{Si}_{\text{Ga}} + V_{\text{As}} \rightarrow \text{Si}_{\text{As}} + V_{\text{Ga}}$ ). В соответствии с теоретическими расчетами [12] в зависимости от положения  $E_F$  вакансии As может находиться в четырех зарядовых состояниях с  $z = -2, -1, 0, +1$  (рис. 3), а энергии составляют для перехода  $-2 \rightarrow -1$   $E = 0.04$ , для  $-1 \rightarrow 0$   $E = 0.14$ , для  $0 \rightarrow +1$   $E = 0.38 \text{ эВ}$ .

Близкие значения энергии (0.04, 0.18, 0.50 эВ) для электронных переходов, связанных с  $V_{As}$ , приводятся в [13]. Учитывая вышеизложенное, можно предположить, что центр, обуславливающий пик  $XI$  в спектре НЕСГУ облученного GaAs, включает в свой состав  $V_{As}$  в нулевом зарядовом состоянии.

- [1] Ланг Д. В. // Точечные дефекты в твердых телах. М., 1979. С. 187—220.
- [2] Pons D., Bourgoin J. C. // J. Phys. C. Sol. St. Phys. 1985. V. 18. P. 3839—3871.
- [3] Bourgoin J. C., Bardeleben H. J., Stievenard D. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 9. P. K65—K91.
- [4] Bourgoin J. C., Bardeleben H. J. // Wiss. Beitr. M. Luther-Univ. Halle, Wittenberg, 1987. Reich O. N 23/1. Pt 1. P. L14/1—L14/37.
- [5] Stievenard D., Bourgoin J. C. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. N 3. P. 743—747.
- [6] Brudnyi V. N., Peshev V. V. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 105. P. K57—K60.
- [7] Zakharenkov L., Kozlovskii V., Pilkevich Ya. // Phys. St. Sol. (a). 1989. V. 111. P. K215—K218.
- [8] Козловский В. В., Кольченко Т. И., Ломако В. М. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 3. С. 545—550.
- [9] Pons D., Mircea A., Bourgoin J. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 8. P. 4150—4155.
- [10] Dlubek G., Krause K. // Wiss Beitr. M. Luther-Univ. Halle, Wittenberg, 1987. Reihe O. Pt 2. P. L15/1—L15/65.
- [11] Maguire J., Newman R. C., Beall R. B. // J. Phys. C. Sol. St. Phys. 1986. V. 19. P. 1897—1907.
- [12] Puska M. J. // Phys. St. Sol. (a). 1987. V. 102. N 1. P. 11—29.
- [13] Loualiche S., Nousilhat A., Lannoo M. // Sol. St. Commun. 1984. V. 51. N 7. P. 509—513.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина  
Минск

Получена 28.12.1990  
Принята к печати 11.03.1991