

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ КАРБИД-КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

Веренчикова Р. Г., Водаков Ю. А., Литвин Д. П., Мохов Е. Н.,  
Роевков А. Д., Санкин В. И.

Приведены характеристики различных карбид-кремниевых фотоприемников: 1) на барьере Шоттки; 2) на  $p-n$ -переходах, полученных эпитаксией и диффузией алюминия и бора; 3) лавинные фотодиоды. Показано, что они обладают высокой эффективностью в УФ области спектра с максимумом чувствительности 250—330 нм и сохраняют работоспособность до температур 500 °С.

Создание твердотельных фотоприемников (ФП) с высокими значениями пороговой чувствительности и быстродействием в УФ области спектра является насущным требованием современной техники. Используемые в настоящее время полупроводниковые материалы не в полной мере обеспечивают эффективную работу таких фотоприемников в области длин волн 200÷300 нм. По ряду свойств карбид кремния гексагональной модификации выгодно отличается в этом отношении от других материалов. Кроме известной высокой радиационной стойкости этого материала [1], он обладает необходимыми спектральными характеристиками. Согласно [2], в области спектра 4÷5 эВ коэффициент поглощения  $\alpha$  для SiC меняется от  $10^3$  до  $5 \cdot 10^4$  см<sup>-1</sup>. Для других известных полупроводников величина коэффициента поглощения на коротковолновой границе указанной области превышает  $10^5$  см<sup>-1</sup>, что затрудняет получение высокой квантовой эффективности из-за существенных потерь, вызванных поверхностной рекомбинацией. Еще одним достоинством SiC-ФП является отсутствие чувствительности к видимому свету с длиной волны больше 435 нм для 300 К.

В работах [3, 4] показана возможность детектирования УФ излучения карбид-кремниевыми  $p-n$ -переходами, а в работе [5] приведены спектральные характеристики и фоточувствительность барьеров Шоттки на основе 6H-SiC. Следует отметить, что спектральные характеристики фоточувствительности приборов с  $p-n$ -переходами имели резкий спад в области 300 нм (в силу расположения области объемного заряда на некотором расстоянии от поверхности). Как отмечалось выше, фоточувствительность 6H-SiC ( $E_g = 3.07$  эВ,  $T = 300$  К [6]) должна быть высокой и в области  $\lambda < 300$  нм. Кроме того, более коротковолновой границы можно достигнуть с помощью фотоприемников на основе 4H-SiC, ширина запрещенной зоны которого на  $\Delta E = 0.19$  эВ больше, чем в 6H-SiC [7]. Фотодиоды с барьером Шоттки обладают несомненным преимуществом для детектирования коротковолновой области спектра, так как фоточувствительная область находится у поверхности, однако в карбиде кремния удается формировать очень «мелкие»  $p-n$ -переходы, достигая также высокой коротковолновой чувствительности.

Цель данной работы заключалась в создании и исследовании фотодиодов с барьером Шоттки и  $p-n$ -переходами на основе карбида кремния.

### Фотодиоды с барьером Шоттки

Барьеры Шоттки формировались на поверхности монокристаллических пластин карбида кремния или на эпитаксиальных пленках, выращенных на таких пластинах по методике, описанной в [8]. Как правило, это были образцы

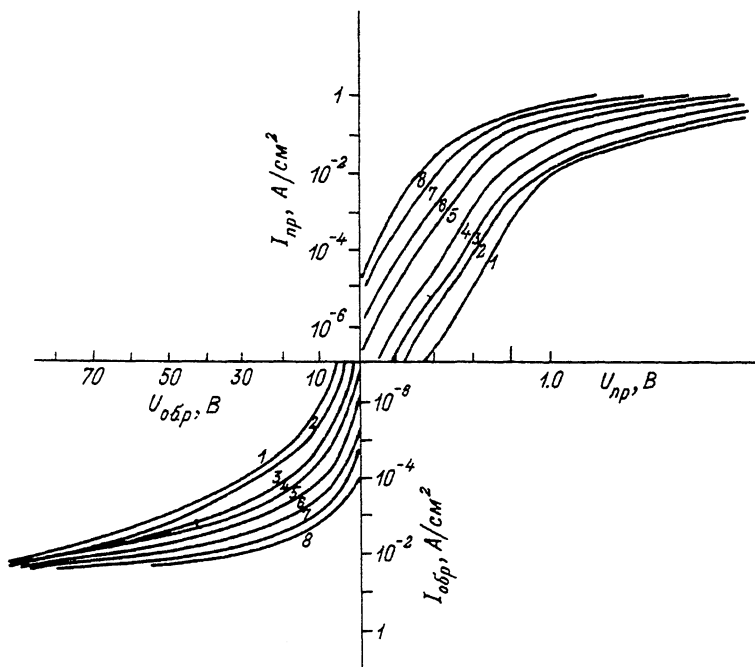


Рис. 1. ВАХ барьера Шоттки  $n$ -типа электропроводности с концентрацией  $N_d - N_a = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при различных температурах.

$T, ^\circ\text{C}$ : 1 — 20, 2 — 70, 3 — 100, 4 — 147, 5 — 210, 6 — 250, 7 — 295, 8 — 330.

$n$ -типа проводимости с типичной концентрацией  $N_d - N_a \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . В качестве полупрозрачного металлического контакта использовался тонкий слой напыленного в вакууме хрома. При площади контакта  $10^{-2} \text{ см}^2$  емкость таких структур составляла около 700 пФ при нулевом смещении. Вольт-амперная характеристика поверхностно-барьерного диода показана на рис. 1. Прямая ветвь ВАХ описывается выражением

$$I \sim \exp \frac{e\varphi}{kT} \exp \left( \frac{eV}{nkT} - 1 \right),$$

где  $\varphi$  — высота барьера, равная для  $6H\text{-SiC}$   $1.2 \div 1.3$ , а для  $4H\text{-SiC}$  —  $1.5 \div 1.6$  эВ. Коэффициент идеальности барьерной структуры  $n = 1.05 \div 1.1$ . Обратная ветвь ВАХ обусловлена туннелированием и в области температур  $300 \div 650 \text{ К}$  неплохо описывается выражением для многофононного туннелирования [9]. Приведенная ВАХ показывает достаточно высокое совершенство диодных структур. Диффузионная длина дырок определялась по методике, описанной в [10], и составляла для исследованных структур  $L_p = 0.2 \div 0.3 \text{ мкм}$ , а ширина ООЗ  $W = 0.15 \div 0.5 \text{ мкм}$  при  $V = 0 \text{ В}$ . В области длин волн  $250 \div 300 \text{ нм}$   $W + L_p = (1 \div 2)l/\alpha$ , что дает основания ожидать высокой квантовой эффективности и высокого быстрого действия фотоприемника. Спектральные характеристики фотодиодов, как и другие характеристики, определялись в вентильном режиме работы. На рис. 2 показаны спектры фотодиодов в режиме фототоков короткого замыкания  $I_{кз}$ , которые снимались на двойном спектрометре СДЛ-1 с разрешением  $0.03 \text{ эВ}$ , что позволяло резко уменьшить влияние рассеянного света в области  $4.0 \div 6 \text{ эВ}$ . В области  $1.4 \div 2.8$  для  $6H\text{-SiC}$  и  $1.6 \div 3.1 \text{ эВ}$  для  $4H\text{-SiC}$  основной вклад в фототок вносят электроны, эмитируемые из металла и с уровней поверхностных состояний

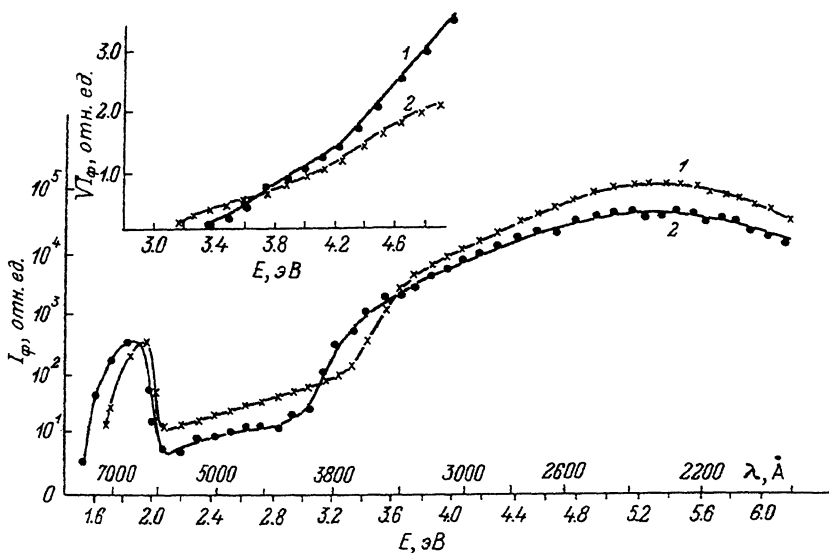


Рис. 2. Спектральные характеристики фототока короткого замыкания барьеров Шоттки.

1 — политип 4H-SiC ( $N_d - N_a = 1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), 2 — политип 6H-SiC ( $N_d - N_a = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

на границе раздела. Резкое увеличение фототока происходит при энергии первого непрямого перехода, при этом фоточувствительность в собственной области спектра на 1.5—3 порядка больше, чем в области малых энергий. При энергиях фотонов 4.4—4.5 эВ наблюдается тенденция роста величины фототока, в координатах  $I_{\text{ф}}^{1/2} \approx f(E)$  спектральная кривая претерпевает заметный излом. Существенно, что эта особенность наблюдается в спектрах обоих политипов, и точка излома практически совпадает по энергиям. В спектрах фоточувствительности, приведенных в [5], такой особенности не было обнаружено. Ранее сообщалось о наличии особенности около 4.6 эВ в спектрах поглощения [2] и отражения [11], которая, предположительно, приписывалась прямым переходам. Наличие идентичных особенностей в спектрах фототока в 6H- и 4H-SiC вблизи 4.4—4.5 эВ является достаточно веским аргументом в пользу этого предположения, поскольку энергии непрямых переходов в этих политипах должны существенно различаться подобно тому, как различаются первые непрямые запрещенные зазоры в 6H- и 4H-SiC. Максимальная величина абсолютной фоточувствительности на длине волны  $\lambda = 250 \text{ нм}$  составляла  $\theta = 0.15 \text{ А/Вт}$ , пороговая чувствительность  $P = 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ , напряжение холостого хода  $U_{\text{хх}} = 0.52 \text{ В}$ . Следует отметить чувствительность ФП на длине волны  $\lambda = 147 \text{ нм}$ , хотя ее величина более чем на 2 порядка меньше, чем в максимуме.

### Фотоприемники с $p-n$ -переходом

Как было указано выше, основная проблема создания таких ФП связана с необходимостью локализации  $p-n$ -перехода вблизи поверхности. Чем более коротковолновой должна быть граница спектральной чувствительности, тем ближе к поверхности необходимо располагать  $p-n$ -переход. Например, для эффективного детектирования сигналов с длиной волны  $\lambda \approx 200 \text{ нм}$   $p-n$ -переход должен залегать на глубине менее  $1000 \text{ \AA}$ . Технически это реализуется с помощью имплантации или диффузии. ФП, полученные имплантационным легированием, мы не исследовали, но такое исследование проведено в [12], где показано, что такие ФП имеют высокие значения квантовой эффективности в области  $\lambda =$

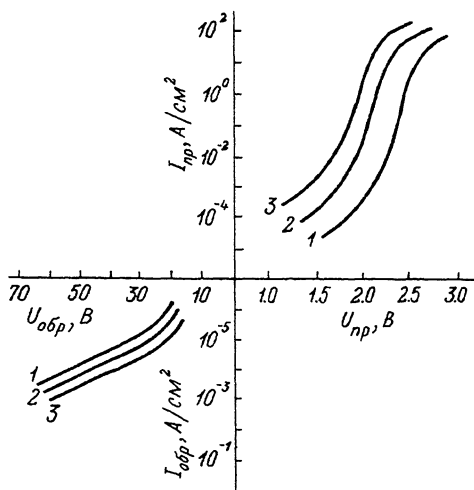


Рис. 3. ВАХ карбид-кремниевый  $p-n$ -перехода, полученного диффузией алюминия в базу  $n$ -типа электропроводности с концентрацией  $N_d - N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при различных температурах.

$T, \text{ K}: 1 - 300, 2 - 470, 3 - 580.$

$= 250 \div 300$  нм. Но, несмотря на это, нельзя не отметить довольно высокие значения обратных токов этих приборов, что, несомненно, является их большим недостатком. В нашей работе исследуются два типа ФП, различающихся способом формирования  $p-n$ -переходов, а именно диффузионные и эпитаксиальные. Первые представляют собой  $p-n$ -переходы, полученные диффузией алюминия или бора в базу  $n$ -типа проводимости с  $N_d - N_a = 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , вторые создавались сублимационной эпитаксией  $p$ -слоя, легированного алюминием, на такую же базу. Диффузия проводилась при температурах  $1900 - 2100^\circ \text{C}$ , а время диффузии составляло  $30 - 120$  мин. Полученные переходы имели диффузионный профиль с градиентом концентрации  $a = 10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-4}$ . Рабочее сечение приборных структур составляло  $10^{-2}, 5 \cdot 10^{-2}, 12.8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ . Поскольку все фотодиоды предназначались для работы в режиме токов короткого замыкания, периферийная поверхность приборов имела естественный вид, приобретаемый после травления в расплаве щелочи. Kontakтами служили: к  $p$ -слою — Al, к  $n$ -слою — Ni. Излучение падало через  $p$ -слой, контакт к которому был в виде точки диаметром  $\sim 50$  мкм на краю освещаемой поверхности. ВАХ фотодиодов при различных температурах приведены на рис. 3. Обратные токи таких  $p-n$ -переходов представляли собой, как правило, токи туннельного происхождения с энергией туннелирования, меньшей ширины запрещенной зоны  $E_g = 1 \div 1.6$  эВ, что, по-видимому, связано с туннелированием через примесные или дефектные состояния. Следует отметить, что уровень обратных токов в этих ФП более чем на порядок ниже, чем в ФП, сформированных имплантацией [12].

Эпитаксиальные  $p-n$ -переходы создавались сублимационной эпитаксией  $p$ -слоя, легированного алюминием, на базу  $n$ -типа. Безусловно, этим методом трудно получить тонкий  $p$ -слой и практически не удается создать ФП с такой же коротковолновой границей, как у вышеописанных. Однако, изменяя толщину  $p$ -слоя в пределах  $1 \div 5$  мкм, можно сдвигать максимум спектральной чувствительности в пределах  $290 \div 340$  нм, создавая таким образом селективность в УФ области. Режим эпитаксии  $p$ -слоя описан в работе [13], где показано, что в таких условиях формируются  $p-n$ -переходы с рекордно низким уровнем обратных токов. Спектральные характеристики ФП с  $p-n$ -переходом, полученные диффузией бора или алюминия, а также эпитаксией, показаны на рис. 4. ФП,

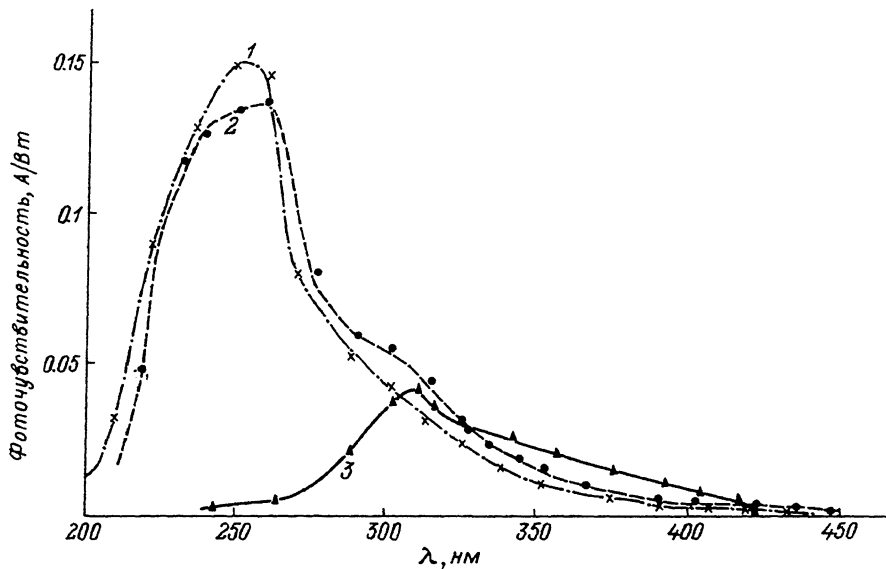


Рис. 4. Спектры фоточувствительности ФП с  $p-n$ -переходом.

1 — диффузия алюминия, 2 — диффузия бора, 3 — эпитаксия алюминия. База  $n$ -типа,  $N_d - N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

созданные диффузией алюминия (рис. 4, кривая 1), имеют следующие преимущества по сравнению с другими (кривые 2, 3): наиболее высокая абсолютная чувствительность, наиболее коротковолновая граница спектральной чувствительности, отсутствие спектральной чувствительности в области длин волн менее 335 для политипа  $6H\text{-SiC}$  и 410 нм для  $4H\text{-SiC}$ . Следует подчеркнуть, что в ФП, созданных диффузией алюминия или бора, коротковолновая граница спектра заметно короче, чем в ФП, созданных имплантацией [12]. Спектральные харак-

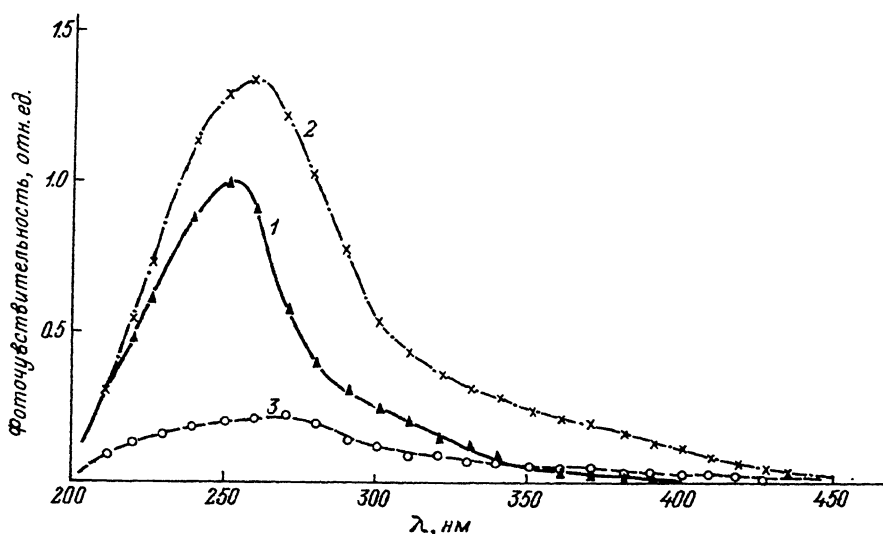


Рис. 5. Спектры фоточувствительности ФП с  $p-n$ -переходом, полученного диффузией Al, при различных температурах.

$T, \text{ K}: 1 - 300, 2 - 573, 3 - 773$ .

теристики фотодиода, полученного диффузией алюминия при различных температурах, показаны на рис. 5. Изменения в спектре с ростом температуры обусловлены в основном двумя процессами: уменьшением ширины запрещенной зоны  $E_g$  и увеличением поглощения с ростом температуры. Меньшее влияние оказывает изменение скорости поверхностной рекомбинации и диффузионной длины, которое проявляется при температурах более 400 °С. В целом же, как видно из рис. 5, чувствительность ФП сохраняется вплоть до 500 °С на достаточном уровне. ФП, созданные по эпитаксиальной технологии (рис. 4, кривая 3), характеризуются отсутствием спектральной чувствительности в области длин волн меньше 435 нм, а также отмеченной выше селективностью.

Работа приборов в течение 10 ч под интенсивным освещением ксеноновой лампы мощностью 200 Вт показала, что SiC-ФП не обнаруживают в отличие от кремниевых ФП какой-либо деградации чувствительности.

### Лавинные фотодиоды (ЛФД)

ЛФД на основе 6H-SiC формировались по эпитаксиальной технологии [13] на базовой плоскости (0001). Последнее принципиально, поскольку только при такой ориентации удастся реализовать преимущество монополярного умножения в 6H-SiC, обусловленное движением электронов в минизоне [14], которое возникает вследствие влияния естественной сверхструктуры  $\alpha$ -карбида кремния на зону проводимости. Следует подчеркнуть, что для реализации указанного эффекта необходимо наращивать на слабо легированную базу  $n$ -типа сильно легированный  $p^+$  (Al)-слой. При этом иницирующими носителями будут преимущественно дырки, что обеспечит низкий уровень избыточного шума [14]. Такой ЛФД был создан нами на подложке 6H-SiC  $n$ -типа проводимости с концентрацией  $N_d - N_a = 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Площадь сечения рабочей части структуры составляла  $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ . Периферийная поверхность для устранения поверхностного пробоя обрабатывалась с целью создания тонкого изолирующего слоя. Полученный  $p-n$ -переход был резким и асимметричным с напряжением однородного лавинного пробоя 71 В. При напряжении 67 В коэффициент умножения составлял  $M = 25$ , а ширина слоя умножения —  $(1.5 \pm 2) \cdot 10^{-5} \text{ см}$ . Пороговая чувствительность  $P = 5 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ . Спектральная характеристика ЛФД аналогична приведенной на рис. 5 (кривая 3).

В заключение можно сказать, что карбид-кремниевые ФП являются эффективными детекторами УФ излучения. При достаточно высокой чувствительности они обладают рядом уникальных достоинств, таких как нечувствительность ко всему диапазону видимого света, отсутствие деградации под действием ультрафиолетового облучения, радиационная стойкость, термостойкость и временная стабильность. Все это позволяет констатировать их перспективность для широких сфер применения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Aukerman L. W., Gorton H. G., Willardson R. K., Major V. E. // Eryson Silicon Carbide a high temperature semiconductors / Ed. by J. R. O'Connor, Smiltens. 1960. P. 388—394.
- [2] Choyke W. I. // Phys. Rev. 1968. V. 172. N 3. P. 769—772.
- [3] Campbell R. N., Hung-Chiang // Sol. St. Electron. 1967. V. 10. N 9. P. 949—953.
- [4] Вюлина Г. В., Холуянов Г. Ф. // Радиотехн. и электрон. 1966. Т. 11. В. 11. С. 2034—2038.
- [5] Баландович В. С., Омар О. А., Попов В. А. // Изв. ЛЭТИ. 1979. № 250. С. 20—23.
- [6] Веренчикова Р. Г., Санкин В. И., Радованова Е. И. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 10. С. 1757—1760.
- [7] Санкин В. И. // ФТТ. 1975. Т. 17. В. 6. С. 1820—1822.
- [8] Дубровский Г. Б., Санкин В. И. // ФТТ. 1975. Т. 15. В. 9. С. 2776—2779.
- [9] Далидчик Ф. И. // ЖЭТФ. 1978. Т. 74. В. 2. С. 472—482.
- [10] Санкин В. И., Веренчикова Р. Г., Водаков Ю. А. и др. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 7. С. 1325—1327.
- [11] Wheeler B. E. // Sol. St. Commun. 1966. V. 4. N 3. P. 173—175.
- [12] Glasov P. A. // Amorphous and Crystalline Silicon Carbide / Ed. by G. L. Harris, C. Y. W. Yang. V. 34. P. 1, 13—33.

[13] Константинов А. О., Литвин Д. П., Санкин В. И. // Письма ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 21. С. 1335—1339.

[14] Санкин В. И., Водаков Ю. А., Литвин Д. П. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 12. С. 2146—2149.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Получена 14.11.1991  
Принята к печати 26.11.1991

---