

УДК 621.372.029.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

И. И. Иткин, А. Г. Морозов, С. М. Шандаров

Получено дисперсионное уравнение для волноводных структур с буферным и защитным слоями и проведен его численный анализ. Исследованы волноводы с различными технологическими параметрами.

В ряде работ [1, 2] сообщалось об исследованиях волноводных свойств пленок Si_3N_4 на подложках из кремния. Для реализации оптических волноводов на кремнии требуется дополнительный буферный слой, изолирующий волноводную пленку от влияния подложки с высоким показателем преломления. Такие многослойные волноводные структуры (ВС) представляют значительный интерес, поскольку на их основе могут быть выполнены как отдельные планарные оптические и оптоэлектронные элементы (высококачественные волноводы и фотоприемники), так и интегральные оптоэлектронные устройства [3].

Основным недостатком пленок нитрида кремния является подверженность внешним воздействиям, вызывающая быстрое ухудшение волноводных свойств. Для защиты наружной поверхности слоя Si_3N_4 возможно использование дополнительной пленки SiO_2 . Введение в ВС еще одного слоя изменяет условия распространения волноводных мод и должно быть учтено в дисперсионном уравнении.

Данная работа посвящена изучению волноводных свойств планарных систем $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{SiO}_2$. Получено дисперсионное уравнение для ТЕ-мод ВС с буферным и защитным слоями, проведены численные расчеты эффективных показателей преломления и коэффициентов затухания волноводных мод для конкретных планарных волноводов. Описана технология изготовления подобных ВС, приведены результаты экспериментального исследования их характеристик.

Дисперсионное уравнение для планарных ВС с буферным и защитным слоями. Рассмотрим планарную ВС, состоящую из пяти слоев (рис. 1), пронумерованных $j=0, 1, 2, 3, 4$. Показатели преломления n_j в пределах каждого слоя постоянны и удовлетворяют следующим условиям. Буферная пленка толщиной Δ , необходимая для изоляции волновода от подложки, имеет показатель преломления $n_3 < n_4, n_2$. При этом возможно использование в качестве подложек материалов с высоким значением $n_4 > n_2$, таких, как кремний и арсенид галлия [4, 5]. Будем считать также, что у материала защитного слоя толщиной d показатель преломления $n_1 < n_2$, а у покровной среды $n_0 < n_1$.

Все среды предполагаем изотропными, тогда волновое уравнение для ТЕ-мод будет иметь вид [6]

$$d^2 E_j^i / dx^2 + (n_j^2 k^2 - \beta^2) E_j^i = 0, \quad (1)$$

где $E_j^i(x)$ — распределение напряженности электрического поля волноводной моды в j -м слое, а β — ее постоянная распространения, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны света в вакууме.

Поскольку во всех средах $n_j = \text{const}$, решение уравнения (1) запишем в виде

$$E_j^i = A_j \exp(i x_j x) + B_j \exp(-i x_j x), \quad j=0, 1, 2, 3, 4, \quad (2)$$

где $\kappa_j = k(n_j^2 - n_m^{*2})^{1/2}$ — поперечные постоянные распространения для слоев с номерами $j=2, 4$, $\kappa_j = -i\gamma_j = -ik(n_m^{*2} - n_j^2)^{1/2}$ для $j=0, 1, 3$, n_m^* — эффективный показатель преломления волноводной моды TE_m , A_j и B_j — постоянные, которые могут быть найдены из граничных условий.

Отметим, что в рассмотренной ВС в общем случае эффективный показатель преломления $n_m^* = n_m' - in_m''$ является комплексным. Мнимая часть n_m^* описывает затухание света в волноводе, обусловленное проникновением поля волноводной моды через буферный слой в подложку, где и происходят потери энергии. Они могут быть связаны как с поглощением света в материале подложки (при этом $n_4 = n_4' - in_4''$ — комплексная величина), так и с возбуждением излучательных мод, уносящих энергию от ВС, при $|n_4| > n_2$.

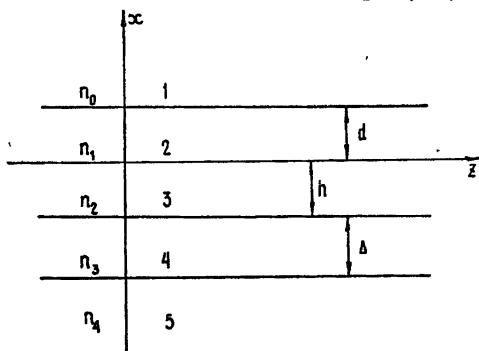


Рис. 1. Планарная ВС с буферным и защитным слоями:
1 — покровная среда, 2 — защитная пленка, 3 — волновод, 4 — буферный слой, 5 — подложка.

Из условия конечности поля в покровной среде при $x \rightarrow \infty$ и условия излучения энергии в подложку при $x < 0$ следует, что в (2) необходимо положить $B_4 = 0$, $A_0 = 0$. Используя далее стандартную методику [7], заключающуюся в применении условий непрерывности тангенциальных компонент электромагнитного поля на границах слоев и обращения в нуль определителя линейной однородной системы уравнений для постоянных A_j , B_j , найдем дисперсионное уравнение для рассматриваемой ВС в виде

$$\sin \left\{ \kappa_2 h - \operatorname{arctg} \frac{\gamma_3}{\kappa_2} - \operatorname{arctg} \left[\frac{\gamma_1 (\gamma_0 + \gamma_1 \operatorname{th}(\gamma_1 d))}{\kappa_2 (\gamma_1 + \gamma_0 \operatorname{th}(\gamma_1 d))} \right] \right\} = \sin \left\{ \kappa_2 h + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{\gamma_3}{\kappa_2} - \operatorname{arctg} \left[\frac{\gamma_1 (\gamma_0 + \gamma_1 \operatorname{th}(\gamma_1 d))}{\kappa_2 (\gamma_1 + \gamma_0 \operatorname{th}(\gamma_1 d))} \right] \right\} \exp(-2\gamma_3 \Delta) \exp \left(2i \frac{\gamma_3}{\kappa_4} \right). \quad (3)$$

Проанализируем уравнение (3). Если толщину буферного слоя Δ устремить к бесконечности, правая часть (3) обращается в нуль, и мы получим дисперсионное уравнение для структур типа «подложка — волновод — защитный слой — покровная среда». Таким структурам соответствует, например, пленочный волновод из Ta_2O_5 с защитным слоем SiO_2 на стеклянной подложке [8]. Отметим, что правая часть уравнения (3) учитывает влияние подложки на волноводное распространение света, обусловленное конечной толщиной буферного слоя.

Приняв $d \rightarrow \infty$, мы найдем из (3) дисперсионное уравнение для ВС типа «подложка — буферный слой — волновод — покровная среда». Такие структуры встречаются при реализации волноводов на кремниевых подложках [9, 10]. И, наконец, при $d \rightarrow \infty$, $\Delta \rightarrow \infty$ из (3) получается хорошо известное дисперсионное уравнение для трехслойных ВС [6].

На основании изложенного выше следует, что дисперсионное уравнение (3) является достаточно общим и описывает дисперсионные свойства TE -мод в ряде многослойных ВС. Оно пригодно и для системы $Si-SiO_2-Si_3N_4-SiO_2$ — покровная среда, учитывает влияние на вол-

новодную моду как подложки с высоким показателем преломления, так и защитного слоя.

Методика и результаты численных расчетов. Важнейшими характеристиками ВС являются эффективные показатели преломления и коэффициенты затухания волноводных мод. Для их определения необходимо найти значения комплексной величины $n_m^* = n_m - in_m$, при которых выполняется соотношение (3). Непосредственное нахождение комплексных корней уравнения (3) численными методами представляется затруднительным, поэтому нами для этой цели использовался метод последовательных приближений для $d=0$.

В нулевом приближении считалось, что толщина буферного слоя велика ($\Delta \rightarrow \infty$). При этом левая часть (3) обращается в нуль, и из получающегося уравнения для трехслойной структуры численными методами определялись вещественные эффективные показатели преломления n_{m0}^* в нулевом приближении.

В первом приближении показатель преломления задавался в форме $n_m^* = n_{m0}^* + \delta n_m^*$, где $|\delta n_m^*| \ll n_{m0}^*$. В пренебрежении членами второго порядка малости, пропорциональными $(\delta n_m^*)^2$, из (3) были получены аналитические выражения для δn_m^* , которые не приводятся здесь ввиду их громоздкости. Найденные формулы для δn_m^* уточняют выражения, приведенные в работе [9], где исследовалось приближение большой толщины буферного слоя, $\exp(-2\gamma_3\Delta) \ll 1$, и не учитывался комплексный характер показателя преломления подложки ($n_4 = n_4' - in_4''$).

Численные расчеты эффективных показателей преломления по изложенной методике проведены на ЭВМ для различных ВС при длине волны $\lambda = 0,633$ мкм. Результаты расчетов представлены в табл. 1, где для сравнения приведены также параметры волноводов, найденные из формул, приведенных в [9]. Сравнение расчетных данных показывает, что при малых толщинах буферного слоя ($\Delta \leq 0,2$ мкм) и для мод высших порядков выражения для расчета коэффициента затухания α волноводных мод из работы [9] дают значительные ошибки. Например, при толщинах волноводного слоя $h = 0,8$ мкм, буферного слоя $\Delta = 0,2$ мкм значения α для мод TE_3 отличаются более чем на 40%.

В табл. 1 также приведены характеристики волноводов с защитным покрытием. При их расчете первоначально находились эффективные показатели преломления n_{m0}^* без учета влияния подложки. Затем рассматривалась ВС типа «покровная среда — волновод — буферный слой — подложка», для которой считалось, что покровной средой является SiO_2 , а в качестве эффективных показателей преломления использовались найденные ранее n_{m0}^* . Проведенные расчеты показали, что ВС $Si-SiO_2-Si_3N_4-SiO_2$ отличаются более низкими значениями коэффициентов затухания, что обусловлено повышением эффективных показателей преломления.

Наиболее высокие эффективные показатели преломления и низкие коэффициенты затухания имеют место для волноводов с $h = 0,8$ мкм при $\Delta = 0,8$ мкм. Это многомодовые волноводы, которые отличаются низкими потерями на низших модах. Уменьшение толщины волноводной пленки до 0,3 мкм позволяет реализовать одномодовые волноводы с достаточно малыми коэффициентами затухания. При уменьшении толщины буферного слоя наблюдается экспоненциальный рост потерь за счет туннелирования энергии волноводной моды в подложку. Таким образом, чтобы получить волноводы с хорошими характеристиками, необходимо иметь буферную пленку толщиной более 0,5 мкм.

Технология структур $Si-SiO_2-Si_3N_4$ и $Si-SiO_2-Si_3N_4-SiO_2$. ВС формировались методами и средствами традиционной кремниевой

Расчетные характеристики ВС на подложках из кремния

№	h, мкм	Δ	Тип моды	Si — SiO ₂ — Si ₃ N ₄			Si—SiO ₂ —Si ₃ N ₄ —SiO ₂	
				α, дБ/см	α по [9], дБ/см	n _m *	n _m *	α, дБ/см
1	0,4	0,2	TE ₀	204	208	1,890	1,896	180
			TE ₁	2337	2089	1,612	1,637	1859
2	0,4	0,4	TE ₀	1,72	1,75	1,891	1,896	1,47
			TE ₁	129	129	1,618	1,642	85,8
3	0,4	0,6	TE ₀	1,4·10 ⁻²	1,5·10 ⁻²	1,891	1,896	1,1·10 ⁻²
			TE ₁	7,86	7,93	1,618	1,642	4,25
4	0,4	0,8	TE ₀	1,2·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻⁴	1,891	1,896	1,0·10 ⁻⁴
			TE ₁	0,48	0,49	1,618	1,642	0,21
5	0,6	0,2	TE ₀	66,8	68,4	1,933	1,935	61,5
			TE ₁	481	485	1,787	1,796	425
			TE ₂	2780	2090	1,530	1,555	2380
6	0,6	0,4	TE ₀	0,43	0,43	1,933	1,935	0,40
			TE ₁	7,86	7,97	1,788	1,773	6,56
			TE ₂	311	293	1,539	1,562	216
7	0,6	0,6	TE ₀	2,8·10 ⁻³	2,9·10 ⁻³	1,933	1,935	2,5·10 ⁻³
			TE ₁	0,13	0,13	1,788	1,796	0,10
			TE ₂	41,2	41,0	1,540	1,562	22,4
8	0,6	0,8	TE ₀	1,8·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻⁵	1,933	1,935	1,6·10 ⁻⁵
			TE ₁	2,1·10 ⁻³	2,2·10 ⁻³	1,788	1,796	1,6·10 ⁻³
			TE ₂	5,71	5,74	1,540	1,562	2,40
9	0,8	0,2	TE ₀	30,1	30,9	1,951	1,952	28,3
			TE ₁	174	178	1,862	1,866	161
			TE ₂	733	724	1,707	1,717	652
			TE ₃	2460	1410	1,477	1,498	2740
10	0,8	0,4	TE ₀	0,18	0,18	1,951	1,952	0,18
			TE ₁	1,76	1,79	1,862	1,866	1,58
			TE ₂	20,9	21,1	1,708	1,719	17,3
			TE ₃	540	417	1,487	1,508	427
11	0,8	0,6	TE ₀	1,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻³	1,951	1,952	9,5·10 ⁻⁴
			TE ₁	1,8·10 ⁻²	1,8·10 ⁻²	1,862	1,866	1,5·10 ⁻²
			TE ₂	0,61	0,62	1,708	1,719	0,47
			TE ₃	137	123	1,489	1,510	80,9
12	0,8	0,8	TE ₀	5,9·10 ⁻⁶	6,1·10 ⁻⁶	1,951	1,952	5,5·10 ⁻⁶
			TE ₁	1,8·10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻⁴	1,862	1,866	1,5·10 ⁻⁴
			TE ₂	1,8·10 ⁻²	1,8·10 ⁻²	1,708	1,719	1,3·10 ⁻²
			TE ₃	37,8	36,5	1,490	1,510	16,4

технологии производства МДП-приборов на кремниевых пластинах, диаметром 40 — 75 мм.

Толщина слоев в процессе роста контролировалась визуально по контрольным образцам цветовым методом, а после нанесения измерялись эллипсометрическим методом.

Перед термическим окислением пластинки отмывались в ацетоне, затем в перекисно-аммиачном и перекисно-соляном растворах.

Экспериментальные результаты. Исследования волноводных свойств проводились на 18 образцах структур $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ и на пяти образцах $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$. Образцы отличались друг от друга по толщинам волноводного и буферного слоев.

Эффективные показатели преломления волноводных мод определялись по углам ввода излучения с длиной волны $\lambda=0,633$ мкм через призму из ниобата лития с помощью гониометра-спектрометра ГС-5. По измеренным значениям из дисперсионного уравнения для трехслойной структуры, получающегося из (3) при $d=0$, $\Delta \rightarrow \infty$, вычислялись параметры волноводного слоя h_v и n_{2v} . Расчеты проводились на ЭВМ по известной методике [6].

Определенные таким образом значения h_v удовлетворительно согласуются с величинами h_a , измеренными в процессе изготовления ВС эллипсометрическим методом. Некоторые расхождения между h_v и h_a (не более 15%) связаны с ошибками измерений и с погрешностями расчета, не учитывающего влияния подложки и защитного слоя на эффективные показатели преломления n_m^* . Коэффициент преломления n_{2v} материала волноводного слоя Si_3N_4 меняется для образцов ВС $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ в пределах 1,96 — 2,03, а для $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ — от 1,90 до 1,95. Разброс значений от образца к образцу связан как с погрешностями измерений и численных расчетов, так и с действительным отличием показателей преломления волноводного слоя у разных ВС.

На рис. 2 показаны дисперсионные зависимости для ТЕ-мод в обобщенных координатах [6], рассчитанные в нулевом приближении ($\Delta \rightarrow \infty$, $d=0$). Экспериментальные точки на рис. 2 соответствуют исследованным ВС. Хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными свидетельствует, что в изученных образцах оксинитридные слои, способные возникать на границе раздела пленок SiO_2 и Si_3N_4 [11], не вносят заметных искажений в профиль показателя преломления ВС.

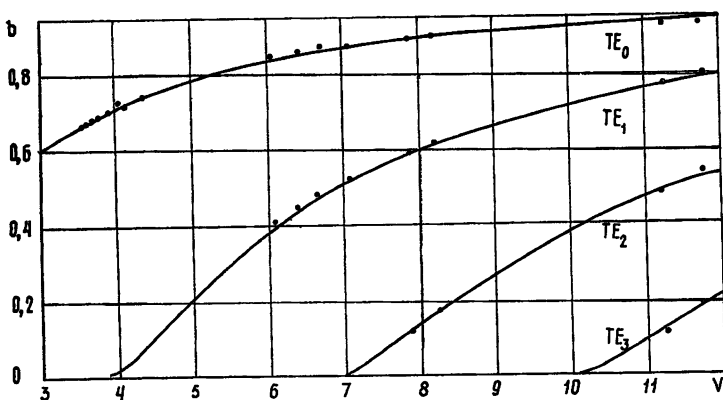


Рис. 2. Зависимость вещественной части обобщенного эффективного показателя преломления $b = (n_m^{*2} - n_3^2) / (n_2^2 - n_3^2)$ от нормированной толщины волноводного слоя $V = kh(n_2^2 - n_3^2)^{1/2}$ для исследованных образцов ВС.

Коэффициенты затухания волноводных мод α_v находились посредством фотометрирования фотографий трека, обусловленного рассеянием направляемого света на микродефектах ВС [6]. Треки фиксируются

Взялись на фотопленке «Микрат-300», фотометрирование проводилось на микрофотометре МФ-2. Определенные таким образом коэффициенты затухания многомодового волновода ($h=0,59$ мкм, $\Delta=0,8$ мкм, $n_2=1,98$) составили для моды TE_0 —0,5 дБ/см и для TE_1 —12,4 дБ/см. Экспериментальные значения коэффициентов затухания α_v значительно превышают расчетные α_p . Это объясняется потерями света за счет рассеяния на дефектах ВС, которое не учтено в расчетах. Минимальные коэффициенты затухания α имеют место для мод TE_0 при толщине буферного слоя $\Delta \geq 0,6$ мкм. Потери света в этом случае могут составлять менее 1 дБ/см.

Важной характеристикой планарного оптического волновода является рассеяние направляемого светового пучка в m -линию [12]. Распределение интенсивности света в m -линии для образцов ВС $Si-SiO_2-Si_3N_4$ и $Si-SiO_2-Si_3N_4-SiO_2$, измеренное с помощью фотодиода и узкой щелевой диафрагмы, приведено на рис. 3. При отклонении от центра пучка на угол в 1° для ВС без защитного слоя падение интенсивности света происходит на 30 дБ, а для образца с защитным слоем соответственно на 34 дБ. Это указывает на более высокое качество волноводов с защитным слоем SiO_2 . Снижение потерь на рассеяние волноводной моды в m -линию в структурах $Si-SiO_2-Si_3N_4-SiO_2$ по сравнению с волноводами $Si-SiO_2-Si_3N_4$ объясняется уменьшением асимметрии волновода с введением слоя SiO_2 , показатель преломления которого превышает таковой для покровной среды.

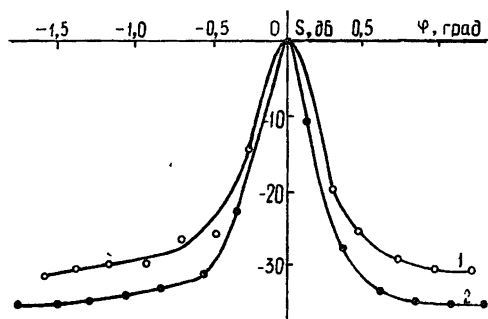


Рис. 3. Угловое распределение интенсивности излучения, выведенного из волновода:
кривая 1 — ВС без защитного слоя, 2 — ВС с защитным слоем.

Кроме повышения качества волноводов с введением защитной пленки уменьшается влияние на ВС внешних воздействий и несколько возрастает эффективность призмных элементов связи [8].

Выше отмечалось, что для снижения коэффициента затухания волноводных мод α необходимо использовать достаточно толстые буферные и волноводные слои. Однако для таких ВС мы наблюдали эффект старения оптических волноводов. Особенно сильно этот эффект проявляется для многомодовых структур с $h=0,8$ мкм и $\Delta=0,8$ мкм. Полное разрушение волноводного слоя Si_3N_4 в лабораторных условиях наступило менее чем через год после его выращивания. Пленки толщиной $h=0,6$ мкм при $\Delta=0,8$ мкм не снижали существенно волноводных свойств и были пригодны для эксплуатации в течение двух лет. Для волноводов с $h=0,3$ мкм, $h=0,42$ мкм при $\Delta=0,8$ мкм существенных изменений оптических свойств со временем обнаружено не было.

Исследования ВС на основе Si_3N_4 на подложках из кремния показали, что структуры с защитным слоем обладают рядом преимуществ, в частности меньшими потерями и хорошей защищенностью от внешних воздействий. Полученное в работе дисперсионное уравнение описывает не только исследованные нами оптические волноводы, но и ряд аналогичных пленочных структур, например на подложках из GaAs без ограничений на толщину буферного слоя. Следует отметить высокое качество волноводов из нитрида кремния, изготовленных по стандартной, хорошо отработанной технологии. Это позволяет использовать их при создании элементов и устройств планарной оптики и интегральной оптоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панькин В. Г., Шашкин В. В. — Письма в ЖТФ, 1978, № 8, с. 440.
2. Stutius W., Streifer W. — Appl. Opt., 1976, 6, p. 3218.
3. Anderson D. B., Boyd J. T., Hamilton M. C., August R. R. — IEEE J., 1977, QE-13, p. 268.
4. Дерюгин Л. Н., Марчук А. Н., Сотин В. Е. — Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1970, № 3, с. 309.
5. Дерюгин Л. Н., Марчук А. Н., Сотин В. Е. — Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1967, № 2, с. 134.
6. Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. — М.: Мир, 1978.
7. Введение в интегральную оптику / Под ред. М. Барноски. — М.: Мир, 1977.
8. Летов Д. А. — Опт. и спектр., 1978, № 4, с. 807.
9. Быковский Ю. А., Кульчин Ю. Н. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 1, с. 52.
10. Tien P. K. — Rev. Modern Phys., 1977, 49, p. 361.
11. Аникин А. И., Горобец А. П., Половинкин А. Н. Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по радиооптике. — Фрунзе, 1981, с. 282.
12. Vahey D. W. Topical meeting on integrated and guided-wave optics. — Incline Village, 1980, p. 1.

Томский институт автоматизированных систем
управления и радиоэлектроники

Поступила в редакцию
29 ноября 1985 г.

THE INVESTIGATION OF OPTICAL WAVEGUIDES FROM SILICON NITRIDE THIN-FILMS ON SILICON SUBSTRATES

I. I. Itkin, A. G. Morozov, S. M. Shandarov

A dispersive equation is obtained for waveguide structure with buffer and shielding layers and a numerical analysis is carried out. The waveguides with different technology parameters have been investigated.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Всесоюзное агентство по авторским правам (ВААП) сообщает, что в 1987 г. агентство производит выплату авторского гонорара за перепечатку за рубежом статей, опубликованных в журнале «Радиофизика» в 1983 и 1984 гг. Гонорар, поступивший за право перепечатки, выплачивается по желанию авторов в рублях или чеках Внешпосылторга.

Для получения гонорара автору необходимо оформить справку-заявление и направить ее на расчет по адресу:

103670 г. Москва, ул. Б. Бронная, 6-а, Валютное управление ВААП.

Справки-заявления на выплату гонорара по журналу 1983 г. издания принимаются до 1 декабря 1987 г., а по журналу 1984 г. — до 1 июля 1988 г. Выплата гонорара по журналу 1984 г. издания будет производиться начиная с июля 1987 г.

По истечении установленных сроков выплаты гонорара неустраиваемые суммы списываются в доход госбюджета и автор теряет право на получение гонорара.