

Тарасенко Елена Олеговна, к.т.н., доцент Кафедры прикладной математики и математического моделирования (ПМ и ММ) Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ). Тел. 8-865-295-68-00, доб. 49-32; E-mail: galail@mail.ru

Гладков Андрей Владимирович, старший преподаватель Кафедры ПМ и ММ СКФУ. Тел. 8-928-313-02-82; E-mail: gavandrew@mail.ru

RESTORATION OF SOURCE ARRANGEMENT HEIGHT IN MATHEMATICAL MODEL OF THIN FILMS GROWTH ON SUBSTRATES

Tarasenko E.O., Gladkov A.V.

Current research in the field of applied mathematics and computer science at the present time is the study of this little-studied physical process as a diffusion growth of thin spat-hella on substrates. Many domestic and foreign scientists have conducted research by decision analytical and numerical methods of initial-boundary value problems, which originally explicitly or implicitly assumed that the solution of the problem exists and is unique. In mathematical modeling there is often a question of solution of inverse problems arising in the research of the diffusion growth of thin spat-hella on substrates. This paper focuses on the solution of inverse problems encountered in the study of the mathematical model. The aim of the study is to develop analytical and numerical solution of the problem of recovering the height of the source atoms spat-hella. Achievement of this goal is based on the intended use of the results and methods of mathematical physics equations, integral equations, mathematical analysis, partial differential equations, solid-state physics, crystallography. An analytical solution of the inverse problem of recovering the height of the source of the atoms of the spat-hella deposited on the substrate. The numerical experiment by the growth of bismuth spat-hella on an aluminum substrate. Analysis of the results of the numerical experiment showed that the results presented in the article are consistent with experimental data. The absolute error of calculation does not exceed 2%. It should be noted that this research is of great practical value and can be used in microelectronics, creating large scale integrated circuits, etc.

Keywords: *thin film, substrate, diffusion, source height, mathematical modeling.*

Tarasenko Elena Olegovna, PhD in Technical Science, Associated Professor of Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel. +7 865 295 68 00. E-mail: galail@mail.ru

Gladkov Andrei, a senior assistant of Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel. +7 928 313 02 82. E-mail: gavandrew@mail.ru

References

1. Bahvalov N.S. *Chislennye metody* (Calculus of approximations). Moscow, Nauka Publ., 1973, 614 p.
2. Galaj E.O. Matematicheskaja model' obrazovaniya plenok na podlozhkah [Mathematical model of films formation on substrates]. *Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki*, 2005, vol. 12, no. 4, p. 932.
3. Denisov A.M. *Vvedenie v teoriju obratnyh zadach* (Introduction to Inverse Problems). Moscow, MGU Publ., 1994, 208 p.
4. Oficial'nyj sajt OOO NPF «Mikrotehnologija». Available at: <http://microtechnologia.ru> (In Russ.)

Received 29.10.2014

УДК 533.9.01

СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАЗМЫ

Панин Д.Н., Адамович Л.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: lva9@yandex.ru

Статья посвящена исследованию с помощью численных методов частотно-избирательных свойств полупроводникового слоя плазмы с неоднородной концентрацией частиц.

Ключевые слова: фильтр, ослабление, полупроводниковая плазма, неоднородный слой, метод дифференциальной прогонки, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, полоса пропускания фильтра, полоса задерживания фильтра, переходная область.

Введение

За последние годы резко возросли уровень и объем требований, предъявляемых к частотным характеристикам устройств, в которых используется диапазон сверхвысоких частот (радиорелейные линии, радиолокаторы, радиотелескопы и др.) [1-4]. Так как по длине волны излучение СВЧ-диапазона является промежуточным между световым излучением и обычными радиоволнами, оно обладает некоторыми свойствами и света, и радиоволн. Многие радиолокационные антенны и другие СВЧ-устройства представляют собой как бы увеличенные варианты оптических элементов типа зеркал и линз [5].

В то же время СВЧ-излучение сходно с радиоизлучением вещательных диапазонов в том отношении, что оно генерируется аналогичными методами. К СВЧ-излучению применима классическая теория радиоволн [6], и его можно использовать как средство связи, основываясь на тех же принципах. Но благодаря более высоким частотам оно дает более широкие возможности передачи информации, что позволяет повысить эффективность связи. В настоящее время направляющая система, помимо собственно фидера (волновода, коаксиальной линии и т.п.), включает большое число различных фидерных устройств: фильтрующих, согласующих, ответвляющих, суммирующих и других [7].

Фильтры – это основной элемент многих радиотехнических устройств. Они используются для разделения или сложения сигналов разных частот в многоканальных системах связи или в узлах радиотехнических устройств. Спектр электромагнитных колебаний ограничен, и его отдельные участки необходимо отделить один от другого; фильтры используются для того, чтобы излучения радиопередатчиков были ограничены заданными пределами спектра; и наоборот, другие фильтры используются для защиты приемников от помех, расположенных вне их рабочей полосы частот. Частотные характеристики фильтров должны удовлетворять жестким требованиям; соответствующий этим требованиям расчет систем называют синтезом.

В настоящей работе численными методами исследуются частотные зависимости ослабления электромагнитной волны, падающей на неоднородный слой полупроводниковой плазмы под произвольным углом [8]. Показано,

что полупроводниковый слой плазмы ведет себя подобно фильтру верхних частот.

Взаимодействие электромагнитной волны с неоднородным слоем плазмы

Рассмотрим неоднородный слой полупроводниковой плазмы, расположенный в координатных плоскостях декартовой системы координат.

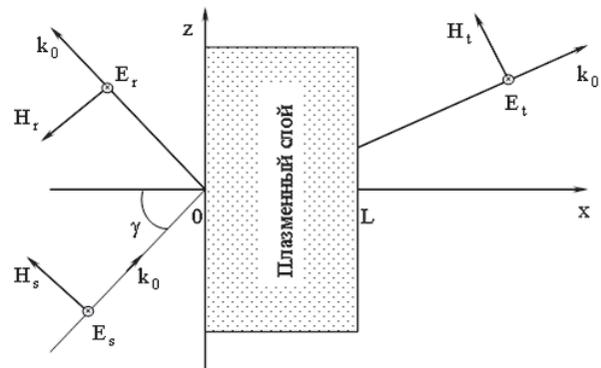


Рис. 1. Наклонное падение для волны с E-поляризацией

В качестве примера приведем геометрию задачи падения на границу слоя под углом γ плоской электромагнитной волны E-поляризации. Пространственные зависимости напряженностей магнитного и электрического полей можно описать следующей нормированной системой уравнений Максвелла.

$$\begin{aligned} \frac{dU}{d\xi} &= -jKV(\xi); \\ \frac{dV}{d\xi} &= -jK[\varepsilon_c(K, \xi) - \sin^2 \gamma]U(\xi), \end{aligned} \quad (1)$$

где: $K = k_0 L$ – нормированная частота; $U(\xi) = E_y(\xi)/E_0$ – нормированная напряженность электрического поля; $V(\xi) = Z_0 H_z(\xi)/E_0$ – нормированная напряженность магнитного поля; $\xi = x/L$ – нормированная координата; $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ – импеданс вакуума; E_0 – комплексная амплитуда напряженности электрического поля.

Исходя из условий непрерывности тангенциальных составляющих полей, представим следующие граничные условия, записанные в нормированном виде.

$$\begin{aligned} U(0) &= 1 + R; & U(1) &= T; \\ V(0) &= (1 - R)\cos \gamma; & V(1) &= T \cos \gamma, \end{aligned} \quad (2)$$

где R – комплексный коэффициент отражения, T – комплексный коэффициент прохождения.

В уравнениях Максвелла (1) фигурирует такая величина, как комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы.

$$\varepsilon_c(K, \xi) = 1 - j \frac{K_p^2(\xi)}{K(jK + K_v)}, \quad (3)$$

где $K_p(\xi)$ – нормированная плазменная частота, K_v – эффективная частота столкновений.

Приведенные уравнения Максвелла (1) и граничные условия (2) составляют так называемую двухточечную граничную задачу. Применяя метод дифференциальной прогонки, удалось свести такую задачу к задаче Коши с начальными условиями. Более того, было получено дифференциальное уравнение, позволяющее определить коэффициент отражения в произвольной плоскости слоя. Представим явный вид дифференциального уравнения, позволяющего рассчитать коэффициент отражения.

$$\frac{dR}{d\xi} = \frac{(1-R)^2 \cos^2 \gamma A_{12} - (1+R)^2 A_{21}}{2 \cos \gamma}. \quad (4)$$

Следует отметить, что данное дифференциальное уравнение является нелинейным с переменными коэффициентами, поэтому пригодно только для численного решения. Таким образом, рассчитав зависимость коэффициента отражения от частоты, мы можем определить частотную характеристику ослабления, которое вносится слоем полупроводниковой плазмы:

$$A(K, \xi) = 20 \lg \left(\frac{1}{\sqrt{1 - |R(K, \xi)|^2}} \right). \quad (5)$$

Численные результаты и выводы

На рис. 2 представлен график частотных характеристик ослабления для однородного профиля электронной концентрации полупроводниковой плазмы при различных углах падения волны Е-поляризации.

Кривая 1 соответствует случаю нормального падения; кривая 2 – падению волны под углом 45° ; кривая 3 – падению под углом 60° . При этом нормированная плазменная частота $K_p(\xi) = K_{pm} = 5$ представляет собой максимальную плазменную частоту электронного газа. На рис. 3 и рис. 4 представлены графики частотных характеристик ослабления для линейного и

параболического профилей при тех же значениях угла падения.

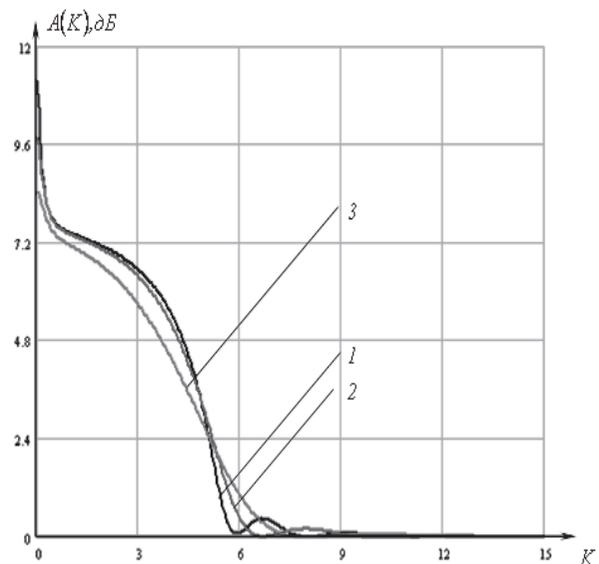


Рис. 2. Частотные характеристики ослабления для однородного профиля электронной концентрации полупроводниковой плазмы

Нормированная плазменная частота, соответствующая линейному профилю, определяется соотношением вида:

$$K_p(\xi) = 4K_{pm}(1 - |1 - 2\xi|). \quad (6)$$

Нормированная плазменная частота, соответствующая параболическому профилю, определяется соотношением вида:

$$K_p(\xi) = 4K_{pm}(1 - \xi)\xi. \quad (7)$$

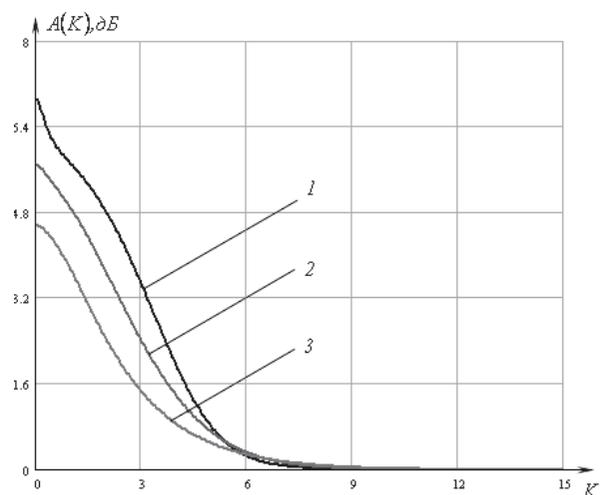


Рис. 3. Частотные характеристики ослабления линейного профиля

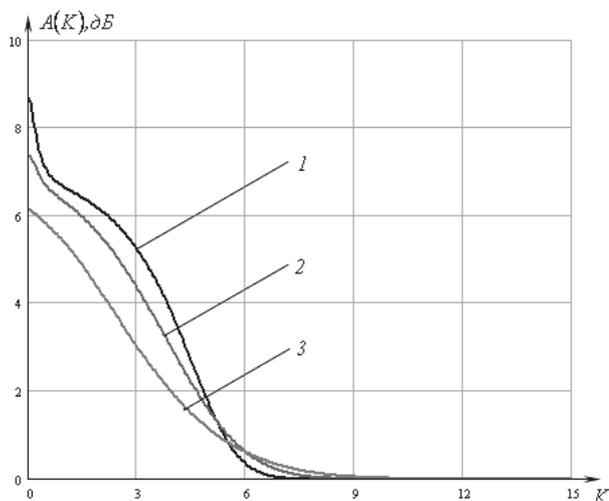


Рис. 4. Частотные характеристики ослабления параболического профиля

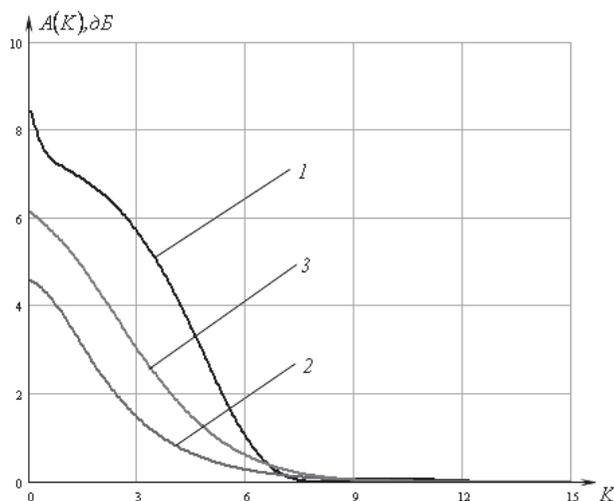


Рис. 7. Частотные характеристики ослабления при угле падения 60°

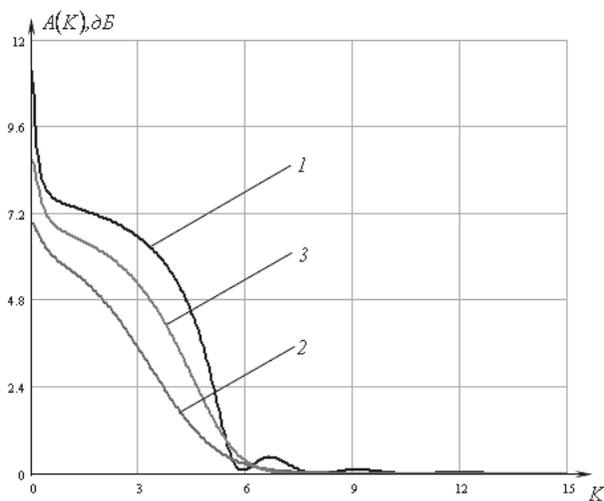


Рис. 5. Частотные характеристики ослабления при нормальном падении волны

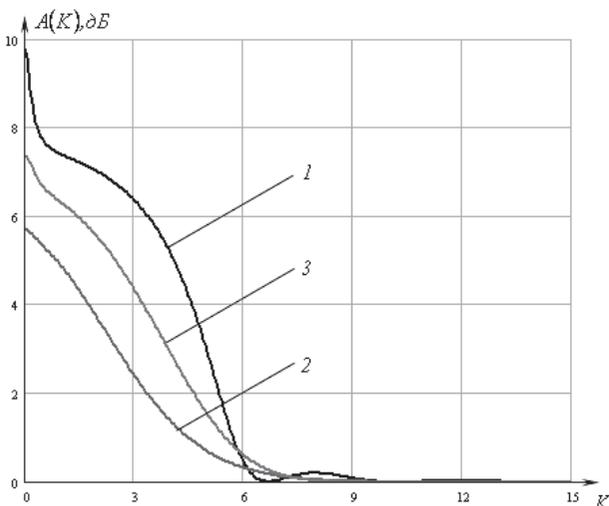


Рис. 6. Частотные характеристики ослабления при угле падения 45°

Во всех расчетах нормированная эффективная частота столкновений $K_v = 0,5$. На рис. 5 изображены частотные характеристики ослабления однородного (кривая 1), линейного (кривая 2) и параболического (кривая 3) профилей при нормальном падении волны. На рис. 6 и рис. 7 представлены характеристики ослабления однородного (кривая 1), линейного (кривая 2) и параболического (кривая 3) профилей при углах падения 45° и 60° соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что при изменении угла падения волны происходит смещение характеристик ослабления в частотной области, что делает возможным изменять положение полосы пропускания и задерживания фильтра. В полосе задерживания ослабление, вносимое однородным слоем плазмы, больше, чем ослабление, вносимое неоднородным слоем. Однако в полосе пропускания ослабление, вносимое однородным слоем, носит неравномерный характер и значительно превышает ослабление, вносимое неоднородным слоем. В переходной области фильтра наилучшую крутизну ослабления имеет однородный и параболический слои плазмы. Из всего можно сделать вывод, что при проектировании фильтров СВЧ-диапазона лучше всего воспользоваться частотной характеристикой ослабления, вносимого полупроводниковым слоем плазмы с параболическим профилем электронной концентрации. Именно эта характеристика имеет большую крутизну нарастания в переходной области по сравнению с линейным профилем и меньшее ослабление в полосе пропускания по сравнению с однородным профилем.

Данные частотной зависимости модулей коэффициентов отражения можно использовать

в экспериментах по электромагнитной диагностике плазмы, в частности, при исследовании степени ее неоднородности. Также полученные результаты будут полезны при проектировании более сложных систем связи, предназначенных для фильтрации электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Устройства такого типа найдут применение в системах высокоскоростной связи на близком расстоянии, в системах обеспечения безопасности, исследовании космоса.

Литература

1. Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 2005. – 648 с.
2. Бочкарева Т.С., Неганов В.А., Осипов О.В., Соболев В.А. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 2003. – 324 с.
3. Неганов В.А., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Линейная макроскопическая электродинамика. Т. 1. М.: Радио и связь, 2000. – 509 с.
4. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухорук А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. – 383 с.
5. Кугушев А.М., Голубева Н.С. Основы радиоэлектроники. Линейные электромагнитные процессы. М.: Энергия, 1969. – 879 с.
6. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. – 684 с.
7. Зайцев В.В., Панин Д.Н., Яровой Г.П. Компьютерный синтез плавных согласующих переходов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т.5, №2, 2002. – С. 59.
8. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 2000. – 559 с.

Получено 24.12.2014

Панин Дмитрий Николаевич, к.ф.-м.н., доцент Кафедры теоретических основ радиотехники и связи (ТОРС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ) Тел. 8-937-179-32-31. E-mail: pdntec@mail.ru

Адамович Людмила Владимировна, старший преподаватель Кафедры ТОРС ПГУТИ. Тел. 8-937-181-09-50. E-mail: lva9@yandex.ru

SELECTIVE PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR PLASMA INHOMOGENEOUS LAYER

Panin D.N., Adamovich L.V.

From the perspective of modern physics semiconductors represent the plasma, fully ionized, but on average, electrically neutral gas. Semiconductor plasma has a number of specific features compared with gaseous plasma. First of all, the possibility of existence at very low temperatures down to absolute zero and a high concentration of particles. Moreover, this electrodynamic environment has properties of high-pass filter. In this paper, based on the trim account of the differential equation for the reflection coefficient was able to obtain the frequency characteristics of attenuation for inhomogeneous plasma layers at different angles of incidence of the electromagnetic wave. The problem for the homogeneous layer at various angles of incidence of the wave, as well as for the parabolic and linear layers with different angle of incidence of the polarized wave. The analysis of the frequency characteristics of attenuation in the passband, and lane keeping. It is shown that the design of microwave filters range it is best to use a frequency characteristic of the attenuation introduced by the semiconductor layer of plasma with a parabolic profile of the electron concentration. This characteristic has a large slew rate, transition region, compared with a linear profile, and less attenuation in the passband, compared with a uniform profile.

Keywords: filter attenuation, semiconductor plasma inhomogeneous layer, the method of differential sweep, the reflection coefficient, a bandpass filter, band filter retention, transition region.

Panin Dmitrii Nikolaevich, PhD in Physical and Mathematical Science, Associated Professor of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication Department, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel. +7 937 179 32 31. E-mail: pdntec@mail.ru

Adamovich Ludmila Vladimirovna, Senior Assistant of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication Department, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel. +7 937 181 09 50. E-mail: lva9@yandex.ru

References

1. Neganov V.A., Osipov O.V., Raevskij S.B., Jarovoj G.P. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* (Electrodynamics and wave propagation). Moscow, Radio i svjaz Publ., 2005, 648 p.

2. Bochkareva T.S., Neganov V.A., Osipov O.V., Sobolev V.A. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* (Electrodynamics and dis-of Radio Waves). Moscow, Radio i svjaz Publ., 2003, 324 p.
3. Neganov V.A., Raevskij S.B., Jarovoj G.P. *Linejnaja makroskopicheskaja jelektrodinamika. T. 1.* (Linear macroscopic electrode Namik. Vol. 1). Moscow, Radio i svjaz Publ., 2000, 509 p.
4. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Suhorukov A.P. *Teorija voln* (Wave Theory). Moscow, Nauka Publ., 1979, 383 p.
5. Kugushev A.M., Golubeva N.S. *Osnovy radiojelektroniki. Linejnye elektromagnitnye processy* (Basics of electronics. (Linear electromagnetic processes)). Moscow, Energiia Publ., 1969, 879 p.
6. Ginzburg V.L. *Rasprostranenie elektromagnitnyh voln v plazme* [Distribution of electronelectromagnetic waves in plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 684 p.
7. Zajcev V.V., Panin D.N., Jarovoj G.P. Komp'juternyj sintez plavnyh soglasujshih perehodov [Computer synthesis of smooth transitions matching]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2002, vol. 5, no. 2, p. 59.
8. Petrov B.M. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* (Electrodynamics and wave propagation). Moscow, Radio i svjaz, 2000, 559 p.

Received 24.12.2014

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.315

ЗАЩИТА ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ ОБЛЕГЧЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ОТ НАГРУЗОК ЗАМЕРЗАЮЩЕЙ В ЗПТ ВОДЫ

Никулина Т.Г.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: ntg81@list.ru

Предложено для защиты ОК от нагрузок замерзающей в ЗПТ воды использовать демпфирующие элементы в конструкции кабеля или микротрубки, прокладываемые совместно с кабелем в ЗПТ. Выполнен расчет размеров демпферов и микротрубок, для разных сочетаний ОК-ЗПТ.

Ключевые слова: оптический кабель, ЗПТ, микротрубка, демпфер, замерзающая вода.

Введение

На сетях связи в России и за рубежом в настоящее время широко используется технология строительства волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) с использованием защитных полимерных трубопроводов (ЗПТ). При данной технологии в грунт сначала прокладывается ЗПТ, а затем в ЗПТ задувается оптический кабель (ОК). Отличительной особенностью данной технологии является применение при строительстве ВОЛП оптических кабелей «облегченной конструкции», то есть без бронепокровов.

Анализ опыта эксплуатации ВОЛП с оптическим кабелем в ЗПТ показывает, что при повреждении трубопровода и нарушении его герметичности в канал трубопровода попадает вода. В России на большей территории грунт в зимнее время промерзает на глубину прокладки ЗПТ и

более, а это приводит к вмерзанию оптического кабеля в лед, если трубопровод заполнен водой [1-3]. Таким образом, кабель, не имеющий бронепокровов и не рассчитанный на воздействие значительных механических нагрузок, может оказаться в более тяжелых условиях, чем бронированный кабель, проложенный непосредственно в грунт.

С учетом этого возникает вопрос о том, каким образом защитить ОК от возможных нагрузок льда в случае повреждения ЗПТ и попадания в него воды.

Обзор существующих решений

Рассмотрим, какие меры могут быть приняты для защиты ОК от воздействия льда в ЗПТ. Одним из возможных решений может быть использование специального, незамерзающего при низких температурах, геля (IceFree™ Antifreeze Gel),