



# Наноматериалы и оптоэлектроника в скоростных системах СВЯЗИ



Любовь ЖУРАВЛЁВА  
Lyubov M. ZHURAVLEVA

Алексей МАЛЫХ  
Alexey N. MALYKH



Александр МАЛЫХ  
Alexander N. MALYKH

*Журавлёва Любовь Михайловна – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.  
Малых Алексей Николаевич – студент 3-го курса МИИТ, Москва, Россия.  
Малых Александр Николаевич – студент 3-го курса МИИТ, Москва, Россия.*

## Nanomaterials and Optoelectronics in High-Speed Communication Systems

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 78)

**В статье рассмотрены вопросы повышения пропускной способности волоконно-оптических систем, используемых на железных дорогах. Проанализированы основные направления увеличения скорости передачи информации, главным из которых является быстроедействие оптических модуляторов и фотоприёмников за счёт совершенствования функциональной среды оптоэлектронных устройств и снижения инерционности материала. Для этой цели предложены новые материалы в виде многослойных наноструктур, технология изготовления и методика оценки их качественных характеристик, необходимая при проектировании оптоэлектронных приборов.**

**Ключевые слова:** железные дороги, каналы связи, информационная сеть, изотопический эффект, пропускная способность, наноструктуры, волоконно-оптическая система, оптоэлектронные приборы.

С постоянным увеличением скоростей и объёмов железнодорожных перевозок возрастают требования к качеству и скорости передачи информации. Поэтому одной из главных задач является создание высокоскоростной системы связи. Решение ее позволит повысить оперативность управления движением поездов, организовать видеонаблюдение на переездах, в тоннелях и на других особо важных объектах железнодорожного транспорта. В настоящее время отмечается устойчивый рост пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), в конце второго десятилетия нашего века она, как ожидается, должна будет достигнуть величины петабит/с. Добиться такой пропускной способности удастся за счёт совершенствования базовых элементов ВОСП, волноводов, освоения новых оптических диапазонов. Основные направления в этой сфере отмечены на рис. 1.

Первый путь – это увеличение скорости передачи сигналов (расширение возможностей оптоэлектронных устройств), второй –

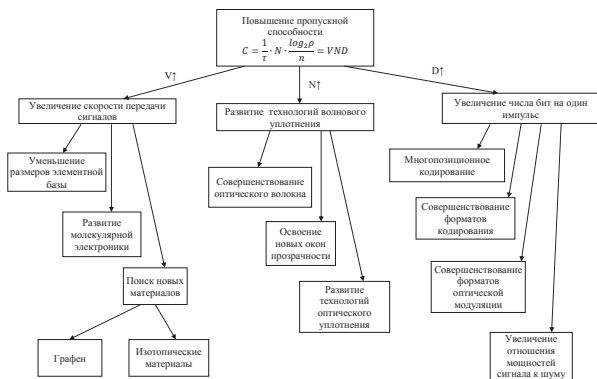


Рис. 1. Пути повышения пропускной способности ВОСП.

развитие технологий волнового уплотнения (освоение частотного ресурса оптического волокна), третий — рост числа бит информации, приходящихся на один импульс. В первом случае главную роль играют уменьшение геометрических размеров и повышение качества материала базовых элементов ВОСП, а также технологии производства. Во втором — совершенствование оптического волокна, в третьем случае — развитие информационных технологий (сжатие сигналов, многопозиционное кодирование, улучшение форматов оптической модуляции, снижение шумов квантования и т.д.).

Наиболее эффективным способом повышения пропускной способности стало увеличение скорости передачи сигналов, которое зависит от быстродействия базовых элементов ВОСП, прежде всего оптических модуляторов, фотоприёмников. Технические возможности ВОСП ограничиваются пока возможностями базовых элементов, они не позволяют увеличить скорость передачи информации выше 40 Гбит/с. Однако оптическое волокно пропускает сигналы со скоростью более 10 Тбит/с.

Увеличение скорости можно достичь путем уменьшения геометрических размеров, совершенствования оптоэлектронных характеристик материалов и технологий изготовления с переходом в области нанотехнологий. Существующие физические и технологические пределы уменьшения размеров базовых элементов ВОСП свидетельствуют о том, что в будущем для форсирования быстродействия потребуются новые поколения материалов на базе наноструктур из кремния и графена, а также инновационные технологии производства. Поэтому необходимо создание методики

проектирования новых материалов с участием наноструктур (функциональных сред), обеспечивающих требуемое быстродействие, и оценки оптоэлектронных параметров обновляющейся элементной основы.

Главной характеристикой функциональной среды (основы модуляторов, фотоприёмников), определяющей быстродействие оптоэлектронных устройств, является инерционность или продолжительность отклика материала. Это время можно представить в виде длительности нарастания переднего и заднего фронтов импульса  $t_{отк}$ , переносящего при двоичном кодировании один бит информации (рис. 2).

Расчётная модель максимально допустимого времени отклика материала для достижения требуемой скорости передачи сигналов может быть представлена в виде формулы для оценки  $Q$ -фактора [1]:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{2\sigma}, \quad (1)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_0$  — величины сигналов (оптических для модулятора и электрических для фотоприёмника), соответствующие единице и нулю;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение теплового шума фотоприёмника.

Значения  $\mu_1$  и  $\mu_0$  (1) можно найти путем расчёта площади отдельных частей импульса (рис. 2). В результате получится выражение:

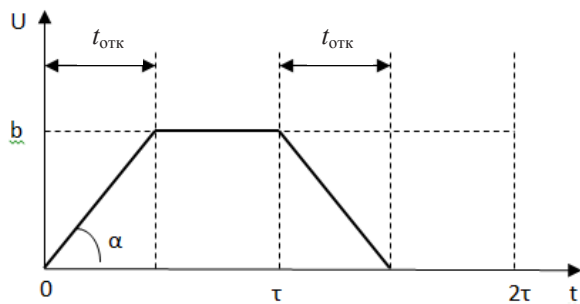
$$t_{отк} = \tau \left(1 - \frac{2Q\sigma}{b}\right), \quad (2)$$

где  $\tau$  — длительность элементарного импульса, или величина, обратная скорости передачи сигналов и полосы частот  $f$ , ГГц;

$b$  — величина амплитуды электрического импульса, равная произведению амплитуды оптического импульса ( $A$ ) и чувствительности фотоприёмника ( $R$ ).



Рис. 2. Упрощенная модель импульса, переносящего один бит информации ( $t_{отк}$  – время отклика материала).



Минимальное значение  $Q$ -фактора, при котором вероятность ошибки составляет величину  $10^{-5}$ , а качество связи становится критическим:  $Q = 4$ . Подставив в формулу (2) параметры фотоприёмника ( $\Sigma, b$ ) и требуемое значение скорости передачи ( $1/\tau$ ), можно получить оценку времени  $t_{отк}$  материала, т.е. инерционность, которой должна обладать функциональная среда. Превышение этой величины приведет к тому, что крутизна фронтов импульса будет недостаточна для обеспечения заданного (минимального) качества связи фотоприёмником. Так, для значений  $A = 40$  В,  $\Sigma = 2$  мкВ,  $R = 0,5$  А/Вт,  $\tau = 25$  пс (40 Гбит/с) величина  $t_{отк} = 5$  пс. Для разных значений чувствительности фотоприёмника на рис. 3 представлены кривые зависимости времени отклика  $t_{пер}$  от заданной скорости передачи сигналов.

Как видно из рис. 3, зависимости имеют нелинейный (пороговый) характер, который свидетельствует о том, что существуют критические значения  $t_{отк}$ ; выше них инерционность не является определяющей для увеличения скорости передачи сигналов. Кроме того, требования к качеству материала модулятора или фотоприёмника по инерционности в значительной степени зависят от конструкции фотоприёмника (величины теплового шума, квантовой эффективности, чувствительности и т.д.). Рассмотренная ранее

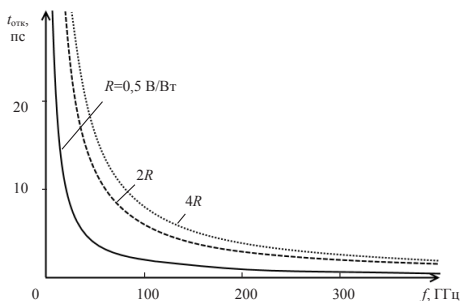


Рис. 3. Зависимость времени отклика материала от скорости передачи сигналов.

расчётная модель инерционности материала пригодна для оценки  $t_{пер}$  модулятора и фотоприёмника.

Известно, что оптические модуляторы отличаются разными принципами работы. Поэтому точные цифры допустимой инерционности материала можно получить путем анализа работы конкретного типа модулятора. Так, в модуляторах Маха-Цендера, в основе которых лежит явление электропреломления, скорость модуляции зависит, главным образом, от электронной поляризации. Она определяется величиной дипольного момента  $p$ , равного произведению заряда электрона на плечо. В объёмных материалах, например, на основе ниобата лития, плечо имеет порядок постоянной кристаллической решетки  $a_{кр}$ . В квантовых структурах (квантовых ямах) величина плеча гораздо больше (равна ширине ямы). Отношение плеч определяет степень инерционности материала, изменения коэффициента преломления и увеличения скорости модуляции. В многослойных квантовых структурах, допустим, сверхрешётках (рис. 4), представляющих собой чередование слоев из полупроводников с различной шириной запрещенной зоны, плечо еще больше, чем у квантовых ям.

В сверхрешётках (СВР) плечом в зависимости от приложенного напряжения может быть как один, так и несколько периодов решетки  $d$  (период – сумма ширины ямы и ширины барьера). Отсюда степень роста частоты модуляции равна отношению  $\kappa_d/a_{кр}$ , где  $\kappa_d$  – число периодов СВР, составляющих плечо.

Наибольшей эффективностью обладают изотопические сверхрешётки.

В таких наноструктурах пространственное ограничение носителей заряда осуществляется соединением слоев из разных изотопов одного и того же вещества. Получаемые при этом «гомопереходы» не будут вызывать

механических напряжений в кристаллической решетке и влиять на волновые функции свободных носителей заряда. Возможность получения изотопических наноструктур с требуемыми характеристиками основывается на изменениях физико-технических параметров (ширины запрещенной зоны, коэффициентов преломления, электросопротивления и т.д.) при различных концентрациях изотопов одного и того же химического элемента (изотопический эффект).

В изотопических сверхрешётках, где глубина проникновения электронов в соседние квантовые ямы больше за счёт меньшей высоты потенциального барьера, чем в СВР из разных полупроводников, плечо может возрасти в несколько раз, а частота модуляции увеличится на порядок, что значительно выше 100 ГГц [2].

Влияние изотопических сверхрешёток (ИСВР) на работу фотоприёмников (ФП) обусловлено уменьшением числа каналов рассеяния света из-за однородности кристаллической решетки и значительного уменьшения дефектов. Это сказывается на увеличении квантовой эффективности фотоприёмника  $K_{эфф}$ , которая непосредственно влияет на его чувствительность. В значительной степени чувствительность в фотоприёмнике на изотопических сверхрешётках повышается за счёт увеличения коэффициента усиления  $g$ . Это происходит из-за повышения времени жизни носителей заряда  $h$  в ИСВР и уменьшения времени их транзита  $t_{тр}$  через ФП.

Так, двукратное повышение скорости носителей заряда в изотопически чистых материалах из кремния приведет к такому же повышению времени жизни носителей и уменьшению времени движения их по фотоприёмнику [2]. При этом в четыре раза увеличатся коэффициент усиления, чувствительность и снизится мощность теплового шума фотоприёмника. Кроме того, использование изотопических сверхрешёток из кремния в полупроводниковых лазерах повышает и эффективность источников света благодаря повышению «времени жизни»

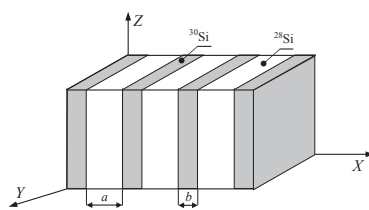


Рис. 4. Модель сверхрешетки на изотопах кремния ( $a$  – квантовая яма,  $b$  – барьер).

экситонов. Это уменьшает полосу излучения полупроводниковых лазеров в два раза, позволяет сократить межканальный интервал, организовать дополнительные волновые каналы в системе волнового уплотнения ВОСП и повысить спектральную эффективность [3].

Таким образом, пропускная способность ВОСП с базовыми элементами на изотопических сверхрешётках возрастает на порядок за счёт:

- 1) увеличения динамического диапазона фотоприёмника (повышения в четыре раза чувствительности и соответственно снижения в четыре раза мощности шумов);
- 2) повышения скорости модуляции оптических модуляторов минимум в два раза;
- 3) уменьшения полосы излучения полупроводниковых лазеров в два раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 261 с.
2. Журавлёва Л. М., Змеева А. А., Новожилов А. В., Кручинин А. С. Повышение эффективности волоконно-оптических систем передачи информации с помощью изотопических сверхрешёток // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – № 12. – С. 60–66.
3. Журавлёва Л. М., Потапов А. А. Развитие отрасли нанотехнологий в России: методология, концепция и практика / Монография. – М.: Научное обозрение, 2014. – 160 с.
4. Журавлёва Л. М., Змеева А. А., Логинов Д. А. Спектральная эффективность и изотопические сверхрешётки // Мир транспорта. – 2012. – № 6. – С. 10–15.
5. Журавлёва Л. М., Новожилов А. В., Кручинин А. С. Потенциальные возможности повышения пропускной способности оптического канала связи // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 7. – С. 11–16.
6. Журавлёва Л. М., Новожилов А. В., Кручинин А. С., Логинов Д. А. Проектирование изотопических сверхрешёток // Телекоммуникации. – 2013. – № 7. – С. 12–18.

Координаты авторов: **Журавлёва Л. М.** – zhlubov@mail.ru, **Малых А. Н.** – aleksey.malykh9@gmail.com, **Малых А. Н.** – aleksandr\_malykh@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 01.06.2015, актуализирована 17.02.2016, принята к публикации 18.02.2016.





**Zhuravleva, Lyubov M.**, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.  
**Malykh, Alexey N.**, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.  
**Malykh, Alexander N.**, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

## ABSTRACT

The article considers issues concerning increase in capacity of fiber-optic systems used on railways. The main directions of increasing information transmission speed are reviewed and analyzed, particularly enhancement of high-speed response of optical modulators and photodetectors through improving functional environment of

optoelectronic devices and reducing inertia of the material. For this purpose, new materials are proposed in the form of multilayer nanostructures, along with manufacturing techniques and methods of assessing their quality characteristics required for design of new optoelectronic devices, that will positively affect railway communication systems' performance.

**Keywords:** railways, communication channels, information network, isotope effect, bandwidth, nanostructure, fiber-optic system, optoelectronic devices.

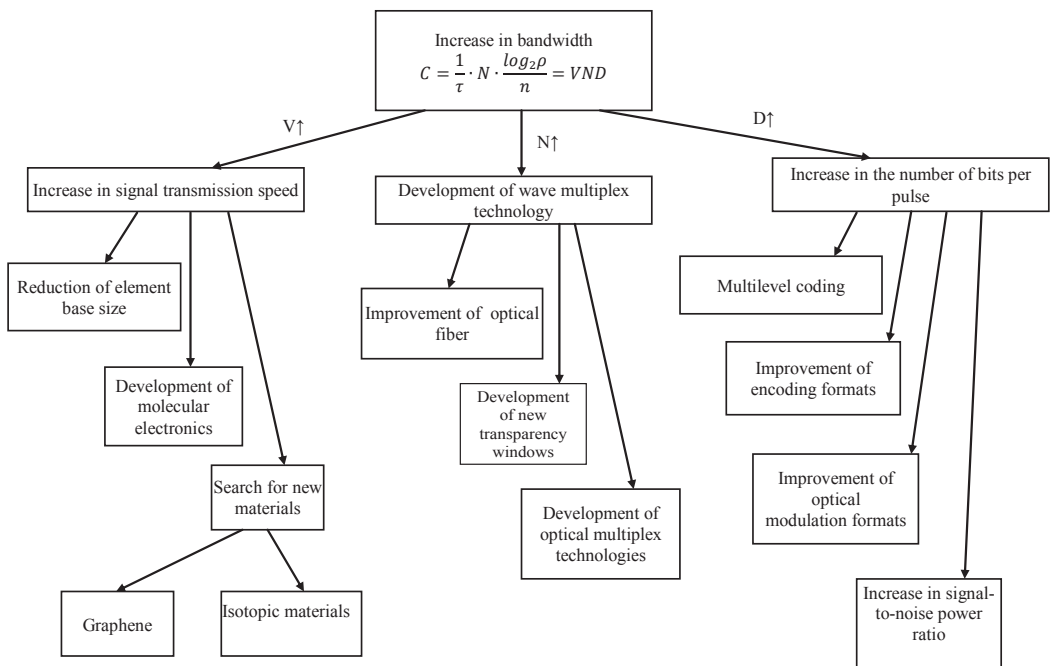
**Background.** With constant growth in speeds and rail traffic volumes requirements for quality and speed of information transmission are also increasing. Therefore, a major objective is to create a high-speed communication system. Achieving that objective will improve efficiency of train control, will facilitate installing video surveillance at level crossings, tunnels and other critical facilities of railway transport. Currently, there is a steady increase in bandwidth of fiber-optic transmission systems (hereinafter – FOTS), at the end of the second decade of the century, it is expected to reach the value of petabit/s. Achievement of such a bandwidth will be possible by improving basic elements of FOTS, wave conductors, development of new optical ranges. Trends in this area are indicated in Pic. 1.

**Objective.** The objective of the authors is to forecast possible ways of enhancement of capacity

of railway communication systems by using nanomaterials and optoelectronics, which can be applied in high-speed communication systems.

**Methods.** The authors use general scientific and radio engineering methods, simulation, comparative analysis, mathematical calculation.

**Results.** The first way is to increase signal transmission speed (expansion of opportunities of optoelectronic devices), the second is development of wave multiplex technologies (development of optical fiber frequency resource), the third is growth in the number of bits of information per one pulse. In the first case, the main role is played by a decrease in geometric dimensions and increase in quality of material of basic elements of FOTS, as well as of production technology. In the second we mean improvement of optical fiber, in the third case – development of information technology (compression



**Pic. 1. Ways to increase bandwidth of FOTS.**

of signals, multilevel coding, improvement of optical modulation formats, reduction of quantization noise, etc.).

The increase in signal transmission speed has proved to be the most effective way to increase bandwidth, it depends on high-speed response of basic elements of FOTS, primarily optical modulators, photodetectors. Technical capabilities of FOTS are limited by capabilities of basic elements, they do not allow to increase information transmission speed up to 40 Gbit/s. However, optical fiber transmits signals with speed over 10 Tbit/c.

The speed increase can be achieved by reducing geometric dimensions, improvement of optoelectronic properties of materials and of manufacturing technology while transferring it into the field of nanotechnology. Existing physical and technological limits of reduction of the size of basic elements of FOTS suggest that in the future to promote high-speed response, a new generation of materials based on nanostructures of graphene and silicon, as well as innovative production technology are required. It is therefore necessary to develop a technique of designing new materials with nanostructures (functional media), providing the required high-speed response, and evaluation of optoelectronic parameters of updated element base.

The main characteristic of functional medium (base of modulators, photodetectors), which determines high-speed response of optoelectronic devices is inertia or duration of response of the material. This time can be represented as duration of buildup of the growth and rear fronts of the pulse  $t_{res}$  transporting in binary encoding one bit of information (Pic. 2).

The computational model of maximum permissible response time of the material to achieve the desired signal transmission speed can be represented as a formula for estimating Q-factor [1]:

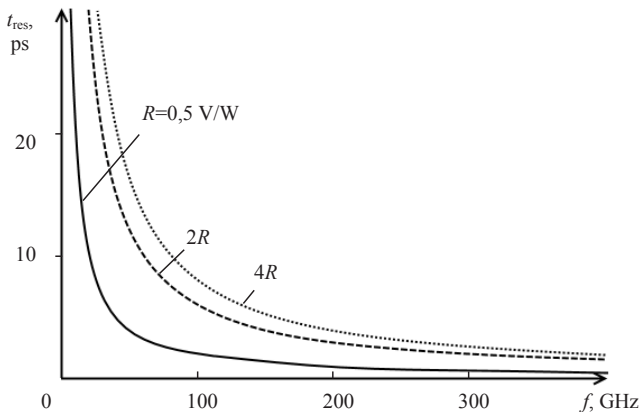
$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{2\sigma}, \quad (1)$$

where  $\mu_1$  and  $\mu_0$  are values of signals (optical signal for modulator and electric signal for photodetector), corresponding to one and zero;  $\sigma$  is standard deviation of thermal noise of photodetector.

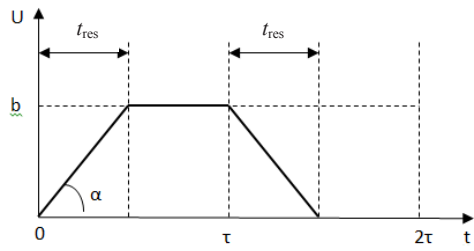
The values of  $\mu_1$  and  $\mu_0$  (1) can be found by calculating the square of pulse parts (Pic. 2). The result is the expression:

$$t_{res} = \tau \left( 1 - \frac{2Q\sigma}{b} \right), \quad (2)$$

where  $\tau$  is duration of elementary pulse, or value reciprocal of signal transmission speed and frequency band  $f$ , GHz;



**Pic. 3. Dependence of response time of material on signal transmission speed.**



**Pic. 2. Simplified model of momentum of pulse that carries one bit of information ( $t_{res}$  – response time of the material).**

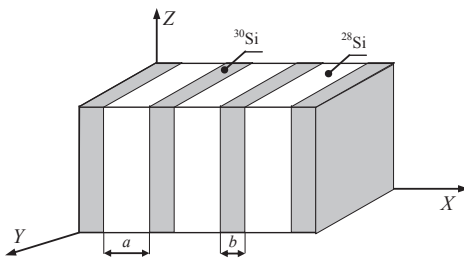
$b$  is amplitude of electric pulse, which is equal to the product of optical pulse amplitude ( $A$ ) and sensitivity of photodetector ( $R$ ).

The minimal value of Q-factor in which probability of error value is  $10^{-5}$ , and quality of communication quality becomes critical is  $Q = 4$ . Substituting in the formula (2) parameters of the photodetector ( $\Sigma$ ,  $b$ ) and the desired transmission speed ( $1/\tau$ ), we can get estimation of time  $t_{res}$  of material, i.e., inertia, that the functional medium should have. The excess of this value will lead to the fact that the steepness of the pulse fronts will be insufficient to ensure the specified (minimum) quality of communication by photodetector. So, for the values  $A = 40$  V,  $\Sigma = 2$  mV/W,  $R = 0,5$  A/W,  $\tau = 25$  ps (40 Gb/s), value of  $t_{res} = 5$  ps. Pic. 3 shows curve of dependence of response time  $t_{tr}$  on the set signal transmission speed for different values of sensitivity of photodetector.

As can be seen from Pic. 3, dependence is of linear (threshold) nature, which indicates that critical values of  $t_{res}$  exist, above which the inertia is not critical to increase signal transmission speed. Furthermore, requirements for quality of material of modulator or photodetector material for inertia are largely dependent on the design of the photodetector (values of thermal noise, quantum efficiency, sensitivity, etc.). Previously considered calculation model of inertia of material is suitable for evaluation of  $t_{tr}$  of modulator and photodetector.

It is known that optical modulators are distinguished by different operating principles. Therefore, precise figures of allowable inertia of the material can be obtained by analysis of the particular type of modulator. Thus, in Mach-Zehnder modulators, which are based on the phenomenon of electric deflection modulation, speed depends primarily on electronic polarization. It is determined by the value of dipole moment  $p$ , equal to the product of the electron charge on the shoulder. In bulk





**Pic. 4. Superlattice model on silicon isotopes (a – quantum well, b – barrier).**

materials, such as lithium niobate, the shoulder has an order of the lattice constant  $a_{lc}$ . In quantum structures (quantum wells) shoulder value is much higher (equal to the width of quantum well). The ratio of shoulders determines the degree of inertia of a material, change in the refraction coefficient and increase in modulation speed. In multilayer quantum structures, for example, in superlattices (Pic. 4) representing an alternation of layers of semiconductors with different band gaps, the shoulder is larger than in quantum wells.

In superlattices (hereinafter – SL) shoulder, depending on applied voltage, consists of one or several lattice spacings  $d$  (spacing is a sum of width of quantum well and the barrier width). Hence, the degree of growth of modulation frequency is equal to the ratio  $\kappa_d/a_{lc}$ , where  $\kappa_d$  is a number of spacings of SL that constitute the shoulder.

Isotopic superlattices are the most effective.

In such nanostructures spatial restriction of charge carriers is carried out via connection of layers of different isotopes of the same substance. Homojunctions obtained through this process will not cause mechanical stresses in the lattice constant either influence wave functions of free charge carriers. The possibility of obtaining isotopic nanostructures with the desired characteristics is based on changes in physical and technical parameters (band gap, refraction coefficient, electrical resistance, etc.) with various concentrations of isotopes of the same chemical element (isotope effect).

In the isotopic superlattices, where the depth of electrons penetration into neighboring quantum wells is larger due to lower height of potential barrier than in SL of different semiconductors, the shoulder can grow by several times, and the modulation frequency will increase by the order, which is well above 100 GHz [2].

Influence of isotopic superlattices (ISL) on operation of photodetectors (PD) is conditioned by a decrease in the number of channels of light dispersion due to uniformity of the lattice constant, and a significant reduction in defects. This affects the increase in quantum efficiency of the photodetector

$K_{eff}$  which directly affects its sensitivity. To a large extent the sensitivity of the photodetector on isotopic superlattices increases through increasing the gain constant  $g$ . This occurs due to the rise time of the charge carriers  $h$  life in ISL and reduction of time of their transit  $t_{tsi}$  through PD.

Thus, a twofold increase in speed of charge carriers in isotopically pure materials of silicon will increase lifetime of carriers and reduce their travel time along photodetectors [2]. Thus a gain constant and sensitivity will grow, and the power of thermal noise of the photodetector will decrease by 4 times. Furthermore, the use of silicon isotopic superlattices in semiconductor lasers improves efficiency of light sources by increasing «lifetime» of excitons. This reduces the emission band of semiconductor lasers by twice, reduces interchannel spacing, arranges additional wave channels in wave multiplex system of FOTS and improves spectral efficiency [3].

**Conclusion.** Thus, bandwidth of FOTS with basic elements on isotopic superlattices increases by an order due to:

- 1) increase in dynamic range of photodetector (four-fold increase in sensitivity and respectively four-fold reduction of noise power);
- 2) increase in modulation speed of optical modulators at least by two times;
- 3) reduction of emission band of semiconductor lasers by twice.

## REFERENCES

1. Sklyarov, O. K. Fiber-optic networks and communication systems [*Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi*]. Moscow, Solon-Press publ., 2004, 261 p.
2. Zhuravleva, L. M., Zmeeva, A. A., Novozhilov, A. V., Kruchinin, A. S. Improving efficiency of fiber-optic data transmission systems using isotopic superlattices [*Povyshenie effektivnosti volokonno-opticheskikh sistem peredachi informacii s pomoshh'ju izotopicheskikh sverhreshetok*]. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy*, 2012, Iss. 12, pp. 60–66.
3. Zhuravleva, L. M., Potapov, A. A. Development of nanotechnology industry in Russia: methodology, concept and practice. Monograph [*Razvitiye otrasli nanotekhnologii v Rossii: metodologiya i praktika. Monografija*]. Moscow, Nauchnoe obozrenie publ., 2014, 160 p.
4. Zhuravleva, L. M., Zmeeva, A. A., Loginov, D. A. Spectral efficiency and isotopic super lattices. *World of Transport and Transportation*, Vol. 10, 2012, Iss. 6, pp. 10–15.
5. Zhuravleva, L. M., Novozhilov, A. V., Kruchinin, A. S. The potential to increase capacity of optical communication channel [*Potencial'nye vozmozhnosti povysheniya propusknoy sposobnosti opticheskogo kanala svyazi*]. *Uspehi sovremennoy radioelektroniki*, 2013, Iss. 7, pp. 11–16.
6. Zhuravleva, L. M., Novozhilov, A. V., Kruchinin, A. S., Loginov, D. A. Design of isotopic superlattices [*Proektirovanie izotopicheskikh sverhreshetok*]. *Telekommunikacii*, 2013, Iss. 7, pp. 12–18. ●

Information about the authors:

**Zhuravleva, Lyubov M.** – Ph.D. (Eng.), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, zhlubov@mail.ru.

**Malykh, Alexey N.** – 3<sup>rd</sup> year student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, aleksey.malykh9@gmail.com.

**Malykh, Alexander N.** – 3<sup>rd</sup> year student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, aleksandr\_malykh@mail.ru.

Article received 01.06.2015, revised 17.02.2016, accepted 18.02.2016.