



Новые материалы в оптоэлектронике



Любовь ЖУРАВЛЁВА
Lyubov M. ZHURAVLEVA

Михаил ИВАШЕВСКИЙ
Mikhail R. IVACHEVSKY



Ильдар МУЗАФАРОВ
Ildar F. MUZAFAROV

Журавлёва Любовь Михайловна – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Ивашевский Михаил Романович – ведущий инженер Московско-Рязанского регионального центра связи Московской дирекции связи ОАО «РЖД», Москва, Россия. Музафаров Ильдар Фирдавусович – студент Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

New Materials in Optoelectronics

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 80)

В статье рассмотрены актуальные вопросы повышения эффективности оптоэлектронных устройств на основе новых материалов. Отмечено, что наиболее перспективным направлением исследований является проектирование полупроводниковых материалов с помощью собственных изотопов химических элементов. Так, очистка от тяжёлых изотопов исходных веществ повышает быстродействие оптоэлектронных устройств, квантовую эффективность, чувствительность фотоприёмников. Наибольший эффект от изотопической очистки можно получить для наноструктурированного материала (сверхрешётки). Его применение позволит создать более чувствительные приборы для ночного видения, солнечных батарей, систем обеспечения безопасности, медицинского оборудования, фотоприёмники сверхдлинного инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: оптоэлектроника, связь, изотопы, очистка, квантовая эффективность, сверхрешётки.

Электроника и оптоэлектроника как её составная часть являются основой высокотехнологичных отраслей мировой индустрии. К ним относятся производства высокоскоростных телекоммуникационных систем, устройств обеспечения безопасности, медицинских диагностических приборов, элементной базы квантовых систем передачи и обработки информации и т.д. Один из приоритетов здесь – разработка полупроводниковых материалов на новых физико-технологических принципах и анализ возможностей производства наноструктур нового поколения [1].

Таким перспективным направлением в оптоэлектронике стала работа с изотопическими материалами. Это молодая область науки, занимающаяся проектированием полупроводников с помощью собственных изотопов химических элементов для получения новых эффектов и оптоэлектронных характеристик. Примером изотопического материала может быть разновидность графита – графен. Для ис-

пользования в электронике его уникальных свойств необходимо «открытие запрещённой зоны» [2, 12]. Искомый эффект можно получить путём повышения процентного содержания тяжёлого изотопа. Противоположное направление проектирования – изотопическая очистка исходного вещества от тяжёлых изотопов.

Уменьшение концентрации тяжёлых изотопов в исходном химическом элементе улучшает оптоэлектронные характеристики полупроводникового материала, повышая прежде всего быстродействие приборов. Для этого применяется технология газового центрифугирования (ГЦФ). Затем изотопически очищенное вещество используется для формирования наноструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1, 4, 5]. Освобождение исходного химического элемента от тяжёлых изотопов позволяет уменьшить дефекты кристаллической решётки и механические напряжения между слоями [1].

ОЦЕНКА ИЗОТОПИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Эффективность уменьшения концентрации тяжёлых изотопов в полупроводниках можно оценить на примере улучшения свойств арсенида галлия при его использовании в фотоприёмнике (ФП). Эти улучшения отражаются прежде всего на повышении коэффициента поглощения α и квантовой эффективности материала η .

Изотопический состав галлия в кристалле $GaAs$ имеет следующий порядок: 60,1 % приходится на изотоп ^{69}Ga и 39,9 % – на более тяжёлый изотоп ^{71}Ga .

Снижение концентрации ^{71}Ga можно трактовать как уменьшение количества дефектов в кристаллической решётке, которое отразится на эффективной массе носителей заряда, например, электрона $m_{эф}$ и ширине запрещённой зоны E_g . Возможные масштабы изменений $m_{эф}$ и E_g можно оценить по материалам публикации [7], в которой приведены результаты исследований зависимости эффективной массы электрона и ширины запрещённой зоны от изменений концентрации легирующих атомов в монокристаллах арсенида галлия. Так, уменьшение концентрации тяжёлого изотопа ^{71}Ga в кристалле арсенида галлия на два порядка может уменьшить: 1) ши-

рину E_g – на 0,06 эВ; 2) величину $m_{эф}$ – в два раза. Это приведёт преимущественно к повышению коэффициента поглощения и квантовой эффективности.

Следует отметить, что наибольшее влияние на оптоэлектронные характеристики материала ФП оказывает квантовая эффективность η .

Известно, что квантовая эффективность оценивается формулой [8]:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

где α – коэффициент поглощения, d – толщина образца.

Коэффициент поглощения [9]:

$$\alpha = K \sqrt{h\nu - E_g}, \quad (2)$$

где $h\nu$ – энергия фотона (произведение постоянной Планка и частоты света). Зависимость коэффициента поглощения от энергии фотона $\alpha = f(h\nu)$ – прямо пропорциональная. Из графика зависимости $\alpha = f(h\nu)$ для арсенида галлия [9] можно рассчитать коэффициент пропорциональности K , исходя из соотношения

$$0,8 \cdot 10^4 = K \sqrt{1,5 - 1,42}, \left(\frac{1}{\text{см}} \right). \quad (3)$$

Следовательно, $K = 2,827 \cdot 10^4 \text{ (см}^{-1} \text{ эВ}^{-1/2})$.

Так, после изотопической очистки галлия от тяжёлых изотопов коэффициент поглощения будет:

$$\alpha = 2,827 \cdot 10^4 \sqrt{1,5 - 1,36} = 1,058 \cdot 10^4, \left(\frac{1}{\text{см}} \right). \quad (4)$$

Эффективность изотопической очистки галлия заключается в повышении квантовой эффективности за счёт увеличения коэффициента поглощения. К примеру, для объёмного кристалла из арсенида галлия толщиной $d = 10^{-4} \text{ см}$ на основании формул (1)-(4) получим:

$$\frac{1 - e^{-1,058 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}}{1 - e^{-0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}} = 1,23 \text{ раза.} \quad (5)$$

То есть величина η после очистки от тяжёлых изотопов увеличилась в 1,23 раза.

Известно, что квантовая эффективность η определяет чувствительность, обнаружительную способность материала ФП и, главное, величину фототока [8]. Отсюда отношение мощностей сигнала к шуму на выходе ФП $\rho_{\text{выхфп}}^2$ до и после изотопической очистки объёмного кри-



Рис. 1. Сверхрешётки (МКЯ) на изотопах кремния (а – квантовая яма, b – барьер).

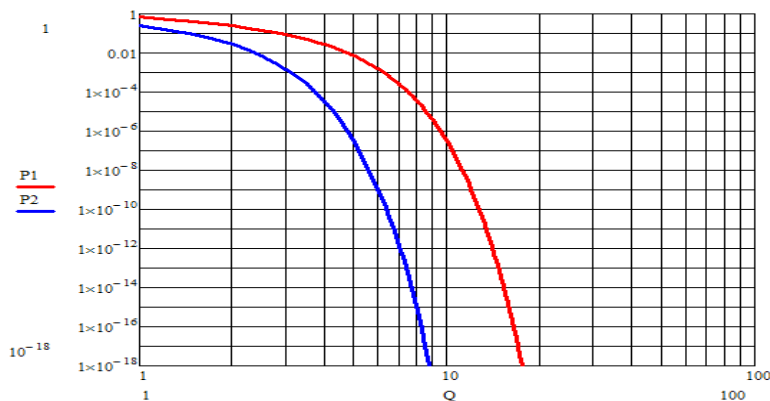
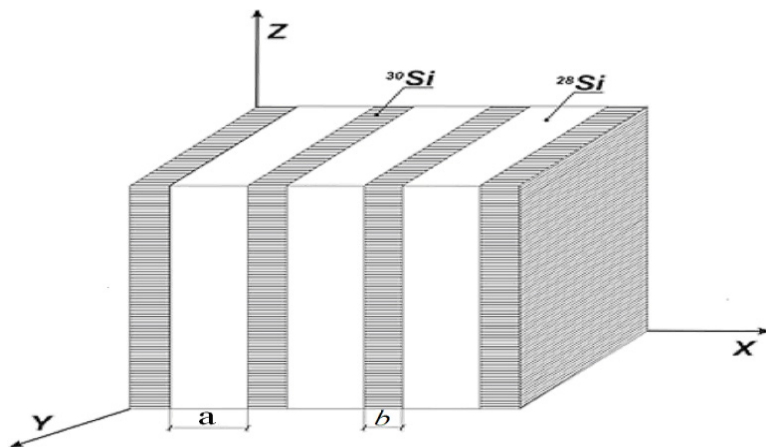


Рис. 2. Зависимость $P_{ош} = f(Q)$ для ФП без очистки (P_1) и с очисткой (P_2).

сталла также увеличится в 1,23 раза. Это приведёт к уменьшению вероятности ошибки $P_{ош}$ и улучшению качества приёма оптических сигналов [10].

Более эффективным материалом для фотоприёмников являются наноструктуры. Это – множественные квантовые ямы (МКЯ) и сверхрешётки (СВР), состоящие из чередования слоёв, например, арсенида галлия (ямы) и алюмината арсенида галлия (барьеры) или изотопов кремния (рис.1) [1]. Отличия между МКЯ и СВР в размерах a и b (для СВР $a = b < 6$ нм).

Для квантовых ям значение d имеет порядок $d = 10^{-6}$ см (10 нм). Отсюда формула (1) для расчёта η преобразуется [6]:

$$\eta \approx \alpha_{ЮИ} \cdot \quad (6)$$

После изотопической очистки получим следующие изменения (увеличение) квантовой эффективности для арсенида галлия в расчёте на одну квантовую яму:

$$\frac{1,06 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}} = 1,325 \text{ раза.}$$

Таким образом, в результате изотопической очистки материала в виде МКЯ в 1,325 раза увеличится η , чувствительность ФП, обнаружительная способность и фототок, величина $\rho^2_{\text{выхфп}}$, определяющая качество приёма ФП.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФОТОПРИЁМА

Используя полученный результат от изотопической очистки материала ФП на МКЯ, а именно, увеличение значений параметра Q^2 и $\rho^2_{\text{выхфп}}$ ($\rho^2_{\text{выхфп}} = 4 Q^2$) более чем в 1,3 раза, рассчитаем вероятность ошибки $P_{ош}$ и аномальную погрешность $\delta^2_{ан}$ [8] соответственно по формулам (7) и (8):

$$P_{ош} = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho^2_{\text{выхфп}}}} \exp\left(-\frac{\rho^2_{\text{выхфп}}}{4}\right); \quad (7)$$

$$\delta^2_{ан} \approx 12P_{ош}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены графики вероятности ошибки для ФП на материале с очисткой $P_{ошоч} = f(Q)$ и без очистки

Вероятность ошибки на выходе фотоприёмника до очистки $P_{ош}$ и после изотопической очистки $P_{ошоч}$

$\rho_{фп}^2$	$P_{ош}$	$P_{ошоч}$
50	$0,142 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-8}$
100	$1,12 \cdot 10^{-12}$	$1,68 \cdot 10^{-15}$
200	$1,08 \cdot 10^{-23}$	$2,8 \cdot 10^{-29}$

$$m = \frac{2}{\sqrt{K \rho_{выхфп}^2} 2\pi} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфп}^2 K}{4 \cdot 2}\right) / \frac{2}{\sqrt{\rho_{выхфп}^2} 2\pi} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфп}^2 K}{4 \cdot 2}\right), \quad (9)$$

$$m = (\sqrt{K}) \cdot \exp\left(\frac{\rho_{выхфп}^2 (K-1)}{4 \cdot 2}\right) = \sqrt{1,325} \exp\left(\frac{50 \cdot 0,325}{4 \cdot 2}\right) = 11,51 \text{ раза}$$

$P_{ош} = f(Q)$ от тяжёлых изотопов, построенные на основании формулы (7).

После изотопической очистки материала вероятность ошибки $P_{ошоч}$ уменьшается на несколько порядков.

Эффективность очистки материала от тяжёлых изотопов в численном выражении представлена в таблице 1. В ней приведены значения вероятностей ошибки до изотопической очистки материала ФП и после неё.

На основании рассчитанных значений вероятности ошибки в таблице 1 можно оценить, во сколько раз улучшится качество приёма оптических сигналов за счёт повышения технических (оптоэлектронных) характеристик полупроводникового материала (арсенида галлия) после изотопической очистки (повышения квантовой эффективности, чувствительности, уменьшения шумов). Так, для минимально допустимого значения $\rho_{выхфп}^2 = 50$, обеспечивающего вероятность ошибки $0,421 \cdot 10^{-6}$ согласно формуле (7), очистка материала позволит снизить вероятность ошибки в 11,51 раза. Сделать расчёт возможного выигрыша m по улучшению качества можно с помощью формулы (9), где $K = 1,325$ – коэффициент увеличения отношения мощностей сигнала и шума на выходе фотоприёмника (6).

Значение выигрыша m за счёт очистки полупроводникового материала фотоприёмника зависит от величины $\rho_{выхфп}^2$ и коэффициента K .

Кроме квантовой эффективности ФП после очистки от тяжёлых изотопов кристаллов галлия улучшатся и другие харак-

теристики материала. Известно, что очистка от тяжёлых изотопов кремния позволила увеличить быстродействие микропроцессоров более чем в два раза за счёт уменьшения эффективной массы электронов и повышения подвижности носителей заряда [3]. Ещё больший эффект за счёт более подвижных носителей заряда в $AsGa$ можно ожидать от арсенида галлия.

ИЗОТОПИЧЕСКИЕ СВЕРХРЕШЁТКИ

Наиболее перспективным материалом для оптоэлектроники в различных областях техники наряду с МКЯ являются полупроводниковые сверхрешётки (СВР), которые характеризуются расщеплением энергетических уровней и образованием подзон проводимости и щелей в квантовых ямах.

Изменяя изотопический состав материала, например, арсенида галлия, можно выбирать расположение энергетических подзон в квантовых ямах и ширину энергетических щелей в СВР (рис. 1) для проектирования новых полупроводников. Это происходит за счёт изменений эффективной массы электрона $m_{эф}$ и ширины запрещённой зоны E_g материала квантовых ям.

Ширина щелей и подзон проводимости определяется исходным материалом, а также шириной барьеров и ям. При проектировании оптоэлектронных приборов, допустим, с фотоэффектом на межподзонных переходах, важно добиться требуемой ширины энергетической щели и количества подзон в квантовой яме. Только одним подбором параметров a и b ям для выбранного материала трудно получить желаемый результат.



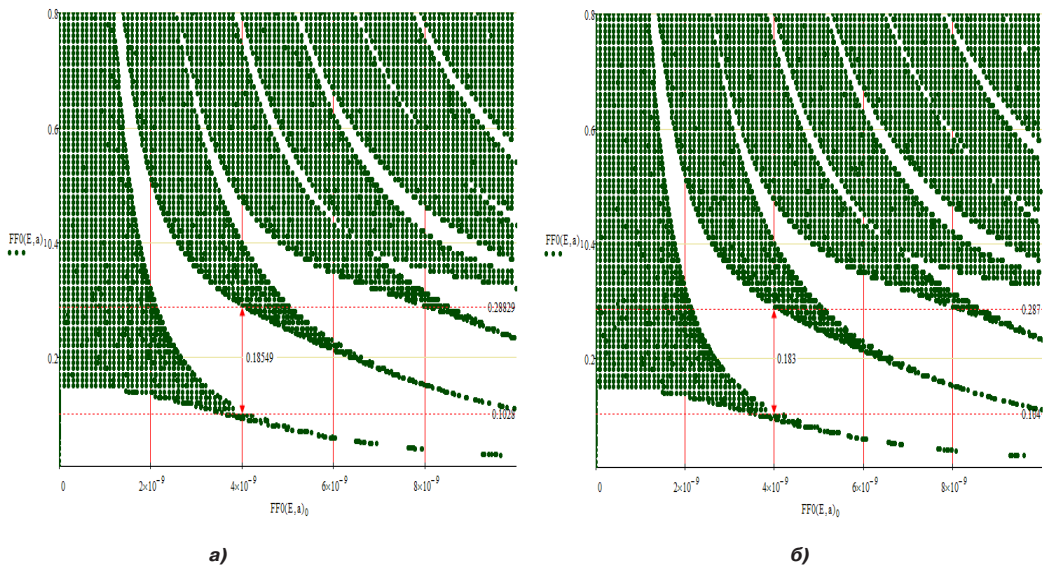


Рис. 3. Зависимости энергетических уровней СВР до и после очистки галлия от тяжёлых изотопов.

С помощью изотопической наноинженерии модель СВР позволяет создавать новые материалы с заранее заданными оптоэлектронными характеристиками [1].

Как уже отмечалось, тяжёлые изотопы можно рассматривать как дефекты кристаллической решётки, которые значительно влияют на электрические, оптические и механические свойства материала.

Механизм влияния дефектов кристаллической решётки на подвижность электронов можно оценить согласно классической теории электропроводности. Так, равноускоренное движение электрона в кристалле под действием электрического поля заканчивается столкновением с дефектом кристаллической решётки [11]. При этом приобретённая скорость в направлении электрического поля падает практически до нуля, затем опять начинается ускорение электрона. Цикл «ускорение–рассеяние» повторяется снова и много раз. Среднее расстояние, пролетаемое электроном от столкновения до столкновения, называется длиной свободного пробега. Для кристаллов кремния известно, что после очистки от тяжёлых изотопов ^{29}Si , ^{30}Si , которые составляют примерно 8 % всех атомов, подвижность электронов повысилась в два раза [3].

Для естественного галлия, который состоит из двух изотопов ($^{69}\text{Ga} - 60,1\%$; $^{71}\text{Ga} - 39,9\%$), очистка кристалла от изотопа ^{71}Ga может повысить подвижность электронов более чем в два раза. С учётом того, что галлий легче кремния (отношение эффективных масс $m_{эф}$ для Si и Ga равно 2,84), можно ожидать большего эффекта от изотопической очистки. Кроме того, количество циклов «ускорение – рассеяние» для галлия будет больше по сравнению с кремнием, а следовательно, и очистка окажется более эффективной. В случае кремния столкновения с тяжёлым изотопом происходят в среднем через каждые девять атомов, для галлия – примерно через каждые два.

Оценку эффекта от очистки от тяжёлых изотопов кристаллов галлия для сверхрешёток можно получить с помощью математического моделирования зависимости энергетических уровней от ширины ямы. Так, значение эффективной массы в результате очистки от тяжёлых изотопов галлия может уменьшиться в два раза, т.е. составить величину $0,067/(2 \cdot m_0)$. Значение запрещённой зоны после очистки может уменьшиться на $0,06$ эВ, т.е. стать $1,424 - 0,06 = 1,364$ эВ [7].

На рис. 3 представлены результаты математического моделирования распределения энергетических зон для СВР из арсенида галлия и алюмината арсенида галлия

без очистки галлия от тяжёлых изотопов (рис. 3а) и с очисткой (рис. 3б).

Расчёт ширины энергетической щели в квантовой яме для параметров $a = b = 4 \text{ нм}$ показал, что очистка уменьшает ширину первой энергетической щели на 3 мэВ , и это может быть существенным фактором для достижения определённой длинноволновой границы фотоэффекта, например, в системах обеспечения безопасности, приборах обнаружения опасных веществ, оценки качества продуктов и т.д.

Таким образом, на основании математического моделирования доказаны изменения оптоэлектронных характеристик (распределение энергетических зон в структуре СВР) после очистки материала от тяжёлых изотопов галлия. С помощью изотопических СВР можно проектировать новые полупроводниковые материалы для фотоприёмников сверхдлинного инфракрасного диапазона (атмосферное окно с длиной волны света до 20 мкм), которые невозможно создать обычным путём.

ВЫВОДЫ

Изменение изотопического состава исходного полупроводника влияет на оптоэлектронные характеристики материала (подвижность носителей заряда, ширину запрещённой зоны, квантовую эффективность и т.д.).

При создании изотопических материалов можно повышать или понижать процентное содержание тяжёлых изотопов в веществе. Так, очистка галлия от тяжёлых изотопов (материала арсенида галлия фотоприёмника) увеличивает отношение мощностей сигнала и шума на выходе ФП и уменьшает на несколько порядков вероятность ошибки.

Наиболее перспективным направлением является создание изотопических сверхрешёток (наноструктур нового поколения). На основе ИСВР могут быть получены новые полупроводниковые материалы для эффективных приборов ночного видения (тепловизоры), солнечных батарей, улавливающих тёмные фотоны, систем обеспе-

чения безопасности, медицинского оборудования и т.д.

Кроме того, изотопическая очистка исходного химического элемента от тяжёлых изотопов позволит создавать более чувствительные пиксели фотокамер и более качественные (эффективные) системы видеонаблюдения, фотоприёмники сверхдлинного инфракрасного диапазона.

В результате представленных исследований доказано влияние очистки на оптоэлектронные характеристики объёмного функционального материала и соответственно на ширину энергетических щелей в квантовых структурах (СВР).

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёва Л. М., Плеханов В. Г. Перспективы применения изотопической наноинженерии в телекоммуникационных системах // Успехи наноинженерии: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. – М.: Техносфера, 2011. – С. 478–491.
2. Плеханов В. Г., Журавлёва Л. М. Изотопическое создание полупроводникового графена // Нанотехника. – 2012. – № 3. – С. 34–38.
3. Press Release (2001) of Isonics Corporation, Golden, Colorado.
4. Журавлёва Л. М., Малых Ал-й Н., Малых Ал-р Н. Наноматериалы и оптоэлектроника в скоростных системах связи // Мир транспорта. – 2016. – № 2. – С. 74–80.
5. Collins A. T., Lawson S. C., Davies G., Kanda H. Indirect energy gap of 13C diamond // Phys. Rev. Lett. 65, 891 – Published 13 August 1990.
6. Разделение изотопов. [Электронный ресурс]: http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Разделение_изотопов&oldid=62541612. Доступ 05.04.2018.
7. Богданова В. А., Давлеткильдеев Н. А., Семиколенова Н. А., Сидоров Е. Н. Эффективная масса электронов в сильно легированном арсениде галлия при упорядочении примесных комплексов // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Том 36. – С. 407–411.
8. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. – М.: Техносфера, 2006. – 588 с.
9. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с.
10. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р. и др. Оценка качества передачи сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 3. – С. 10–15.
11. Верещагин И. К., Кокин С. М., Никитенко В. А. и др. Физика твёрдого тела – М.: Высшая школа, 2001. – 236 с.
12. Журавлёва Л. М., Никулина Ю. А., Лебедева А. К. Перспективы графеновой наноэлектроники // Мир транспорта. – 2016. – № 1. – С. 72–78. ●

Координаты авторов: Журавлёва Л. М. – zhlubov@mail.ru, Ивашевский М. Р. – misha_13@mail.ru, Музафаров И. Ф. – muz.il@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 12.01.2018, актуализирована 15.04.2018, принята к публикации 22.04.2018.



Zhuravlyova, Lyubov M., Russian University of Transport, Moscow, Russia.
Ivashevsky, Mikhail R., Russian Railways JSC, Moscow, Russia.
Muzafarov, Ildar F., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

ABSTRACT

The current problems of increasing the efficiency of optoelectronic devices with the help of new materials are considered in the article. It is noted that the most promising direction of research is the design of semiconductor materials using the own isotopes of chemical elements. Thus, purification from heavy isotopes increases the speed of

optoelectronic devices, quantum efficiency, sensitivity of photodetectors. The greatest effect of isotope purification can be obtained for a nanostructured material (superlattices). This new semiconductor material will create more sensitive instruments for night vision, solar panels, safety systems, medical equipment, ultra-long-range infrared photodetectors.

Keywords: optoelectronics, communication, isotopes, purification, quantum efficiency, superlattices.

Background. Electronics and optoelectronics as its component are the basis of high-tech industries of the world industry. These include production of high-speed telecommunications systems, safety devices, medical diagnostic devices, the elemental base of quantum systems for transmission and processing of information, etc. One of the priorities here is development of semiconductor materials operating on new physical and technological principles and analysis of the possibilities of nanotechnology for production of new-generation nanostructures [1].

Such a promising direction in optoelectronics became the work with isotopic materials. This is a young field of science engaged in the design of semiconductors using own isotopes of chemical elements to obtain new effects and optoelectronic characteristics. An example of an isotopic material can be a variety of graphite – graphene. To use its unique properties in electronics, it is necessary to «open the bandgap» [2, 12]. The desired effect can be obtained by increasing the percentage of heavy isotope. The opposite direction of design is isotopic purification of the initial material from heavy isotopes.

The decrease in concentration of heavy isotopes in the initial chemical element improves the optoelectronic characteristics of the semiconductor material, increasing primarily the speed of the instruments. For this, the technology of gas centrifugation (GCF) is used. The isotopically purified substance is then used to form nanostructures by molecular beam epitaxy (MBE) [1, 4, 5]. Releasing the initial chemical element from heavy isotopes can reduce crystal lattice defects and mechanical stresses between layers [1].

Objective. The objective of the authors is to consider new materials in optoelectronics.

Methods. The authors use general scientific and engineering methods, comparative analysis, mathematical method.

Results.

Estimation of isotopic material

The effectiveness of reducing the concentration of heavy isotopes in semiconductors can be assessed using the example of improving the properties of gallium arsenide when used in a photodetector (PD). These improvements are primarily reflected in the increase in the absorption coefficient α and in the quantum efficiency of the material η .

The isotopic composition of gallium in a crystal GaAs is of the following order: 60,1 % is attributed to the isotope ^{69}Ga and 39,9 % – to the heavier isotope ^{71}Ga .

The decrease in the concentration of ^{71}Ga can be interpreted as a reduction in the number of defects in the crystal lattice, which will affect the effective mass of charge carriers, for example, the electron m_{eff} and the band gap E_g . The possible scales of the changes of m_{eff} and E_g can be estimated from the publication [7], which shows the results of studies of the dependence of the effective electron mass and the band gap width on changes in the concentration of doping atoms in gallium arsenide single crystals. Thus, a decrease in the concentration of the heavy isotope ^{71}Ga in a gallium arsenide crystal by two orders of magnitude can reduce: 1) the width E_g – by 0,06 eV; 2) the value of m_{eff} – by two times. This will lead mainly to an increase in the absorption coefficient and quantum efficiency.

It should be noted that the quantum efficiency η has the greatest influence on the optoelectronic characteristics of PD material.

It is known that quantum efficiency is estimated by the formula [8]:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

where α – absorption coefficient, d – thickness of a sample.

Absorption coefficient [9]:

$$\alpha = K \sqrt{h\nu - E_g}, \quad (2)$$

where $h\nu$ – photon energy (the product of the Planck constant and the frequency of light). The dependence of the absorption coefficient on the photon energy $\alpha = f(h\nu)$ is directly proportional. From the graph of the dependence $\alpha = f(h\nu)$ for gallium arsenide [9], we can calculate the proportionality coefficient K , starting from the relation

$$0,8 \cdot 10^4 = K \sqrt{1,5 - 1,42}, \left(\frac{1}{\text{cm}} \right). \quad (3)$$

Hence, $K = 2,827 \cdot 10^4 \text{ (cm}^{-1} \text{ eV}^{1/2}\text{)}$.

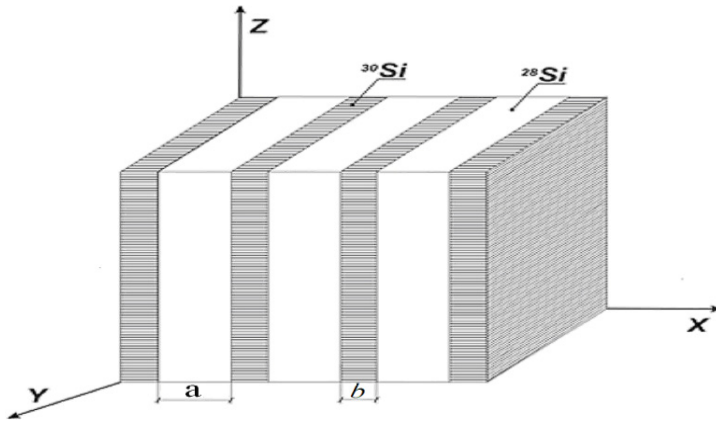
Thus, after isotope purification of gallium from heavy isotopes, the absorption coefficient will be:

$$\alpha = 2,827 \cdot 10^4 \sqrt{1,5 - 1,36} = 1,058 \cdot 10^4, \left(\frac{1}{\text{cm}} \right). \quad (4)$$

The efficiency of isotopic gallium purification is to increase the quantum efficiency by increasing the absorption coefficient. For example, for a bulk crystal of gallium arsenide of thickness $d = 10^{-4} \text{ cm}$ on the basis of formulas (1)–(4), we obtain:

$$\frac{1 - e^{-1,058 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}}{1 - e^{-0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}} = 1,23 \text{ times.} \quad (5)$$

That is, the value of η after purification from heavy isotopes increased by 1,23 times.



Pic. 1. Superlattices (MQW) on silicon isotopes (a – quantum well, b – barrier).

It is known that the quantum efficiency η determines the sensitivity, the detectability of PD material and, most importantly, the magnitude of the photocurrent [8]. Hence, the ratio of the signal-to-noise power at the output of PD ρ^2_{outpd} before and after the isotope purification of the bulk crystal also increases by 1,23 times. This will lead to a decrease in the probability of an error P_{err} and an improvement in the reception quality of optical signals [10].

The most effective material for photodetectors are nanostructures. These are multiple quantum wells (MQW) and superlattices (SL) consisting of alternating layers, for example, gallium arsenide (well) and gallium arsenide aluminate (barriers) or silicon isotopes (Pic. 1) [1]. Differences between MQW and SL in sizes a and b (for SL $a = b < 6 \text{ nm}$).

For quantum wells, the value of d is of the order of $d = 10^{-6} \text{ cm}$ (10 nm). Hence formula (1) for calculation of η is transformed into [6]:

$$\eta \approx \alpha_{1\text{QW}} \quad (6)$$

After isotopic purification, we obtain the following changes (increase) in quantum efficiency for gallium arsenide per quantum well:

$$\frac{1,06 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}} = 1,325 \text{ times.}$$

Thus, as a result of isotopic purification of the material in the form of MQW, η , the sensitivity of the photoconductivity, the detecting power and the photocurrent, the value of ρ^2_{outpd} determining the reception quality of PD, will increase by 1,325 times.

Improving the quality of photo reception

Using the result obtained from isotopic purification of PD material on MQW, namely, an increase in the values of the parameter Q^2 and ρ^2_{outpd} ($\rho^2_{\text{outpd}} = 4 Q^2$) by more than 1,3 times, we calculate the error probability P_{err} and the anomalous error δ^2_{an} [8]) respectively according to the formulas (7) and (8):

$$P_{\text{err}} = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho^2_{\text{outpd}}}} \exp\left(-\frac{\rho^2_{\text{outpd}}}{4}\right); \quad (7)$$

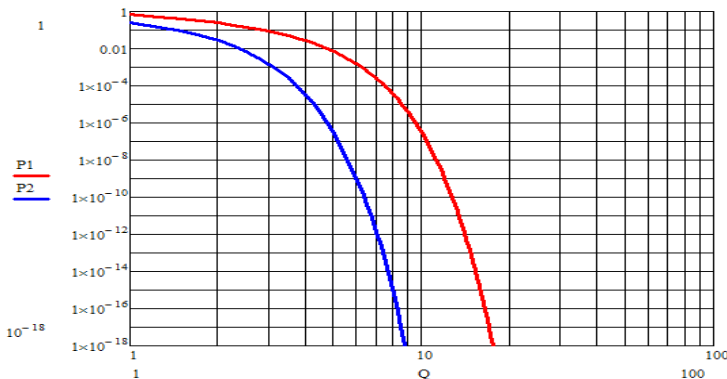
$$\delta^2_{\text{an}} \approx 12P_{\text{err}} \quad (8)$$

Pic. 2 shows the error probability graphs for PD on a material with a purification $P_{\text{errpur}} = f(Q)$ and without purification $P_{\text{err}} = f(Q)$ from heavy isotopes based on the formula (7).

After isotopic purification of the material, the probability of error P_{errpur} decreases by several orders of magnitude.

The efficiency of purification of the material from heavy isotopes in numerical terms is presented in Table 1. It gives the values of the error probabilities before the isotopic purification of PD material and after it.

Based on the calculated error probability values in Table 1, it is possible to estimate how many times the quality of reception of optical signals will improve by increasing the technical (optoelectronic) characteristics of a semiconductor material (gallium arsenide) after isotopic purification (increasing quantum efficiency, sensitivity, noise reduction). Thus, for a minimum allowable value $\rho^2_{\text{outpd}} = 50$, which



Pic. 2. Dependence $P_{\text{err}} = f(Q)$ for PD without purification (P_1) and with purification (P_2).

Table 1
Error probability at the output of photodetector before purification P_{err} and after isotopic purification P_{errpur}

ρ_{pd}^2	P_{err}	P_{errpur}
50	$0,142 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-8}$
100	$1,12 \cdot 10^{-12}$	$1,68 \cdot 10^{-15}$
200	$1,08 \cdot 10^{-23}$	$2,8 \cdot 10^{-29}$

provides the error probability $0,421 \cdot 10^{-6}$ according to the formula (7), purification of the material will reduce the probability of error by 11,51 times. To calculate the possible gain m for improving the quality can be as follows: where $K = 1,325$ – coefficient of increase in the ratio of signal power and noise at the output of the photodetector (6).

The value of the gain m due to purification of the semiconductor material of the photodetector depends on the value of ρ_{outpd}^2 and the coefficient K .

In addition to the quantum efficiency of PD after purification from heavy isotopes of gallium crystals, other characteristics of the material also improve. It is known that purification from heavy silicon isotopes has allowed to increase speed of microprocessors more than twice due to reduction of the effective mass of electrons and increase of mobility of charge carriers [3]. An even greater effect due to more mobile charge carriers in AsGa can be expected from gallium arsenide.

Isotopic superlattices

The most promising material for optoelectronics in various fields of technology, along with MQW, are semiconductor superlattices (SL), which are characterized by splitting of energy levels and formation of conductivity subbands and gaps in quantum wells.

By changing the isotopic composition of the material, for example, gallium arsenide, it is possible to choose the location of energy subbands in the quantum wells and the width of the energy gaps in SL (Pic. 1) for design of new semiconductors. This is due

to changes in the effective mass of the electron m_{ef} and the width of the band gap E_g of the quantum well material.

The width of the slits and the conductivity subbands is determined by the initial material, and also by the width of the barriers and wells. When designing optoelectronic devices, for example, with a photoelectric effect at intersubband transitions, it is important to achieve the required width of the energy gap and the number of subbands in the quantum well. It is difficult to obtain the desired result only with the selection of the parameters a and b of wells for the selected material.

With the help of isotopic nanoengineering, the SL model allows the creation of new materials with predetermined optoelectronic characteristics [1].

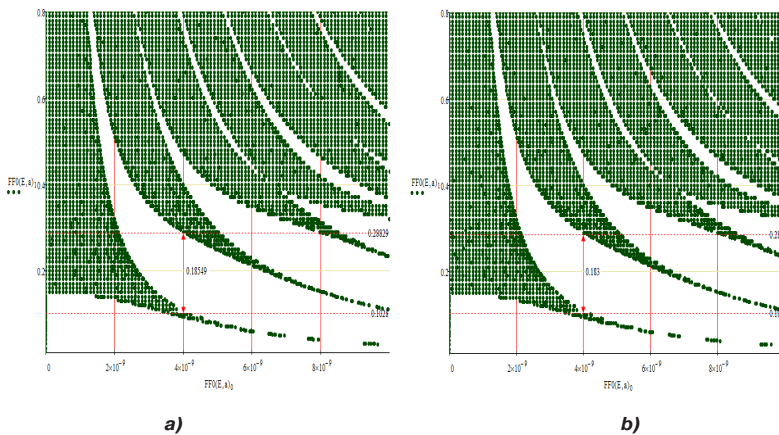
As already noted, heavy isotopes can be regarded as crystal lattice defects that significantly affect the electrical, optical and mechanical properties of the material.

The mechanism of influence of crystal lattice defects on mobility of electrons can be estimated according to the classical theory of electrical conductivity. Thus, the uniformly accelerated motion of an electron in a crystal under the action of an electric field terminates in a collision with a crystal lattice defect [11]. In this case, the acquired velocity in the direction of the electric field drops practically to zero, then the acceleration of the electron again begins. The «acceleration – scattering» cycle is repeated again and again many times. The average distance traveled by an electron from a collision to a collision is called the mean free run. For silicon crystals, it is known that after purification from heavy isotopes ^{28}Si , ^{30}Si , which constitute about 8 % of all atoms, the mobility of electrons has doubled [3].

For natural gallium, which consists of two isotopes (^{69}Ga – 60,1 %; ^{71}Ga – 39,9 %), purification of the crystal from the isotope ^{71}Ga can increase the electron mobility by more than two times. Taking into account the fact that gallium is lighter than silicon (the ratio of effective mass m_{ef} for Si and Ga is 2,84), we can expect a greater effect from isotopic purification. In

$$m = \frac{2}{\sqrt{K \rho_{outpd}^2} 2\pi} \exp\left(-\frac{\rho_{outpd}^2 K}{4 \cdot 2}\right) / \frac{2}{\sqrt{\rho_{outpd}^2} 2\pi} \exp\left(-\frac{\rho_{outpd}^2 K}{4 \cdot 2}\right), \tag{9}$$

$$m = (\sqrt{K}) \cdot \exp\left(\frac{\rho_{outpd}^2 (K - 1)}{4 \cdot 2}\right) = \sqrt{1,325} \exp\left(\frac{50 \cdot 0,325}{4 \cdot 2}\right) = 11,51 \text{ times,}$$



Pic. 3. Dependences of the energy levels of SL before and after purification of gallium from heavy isotopes.

addition, the number of «acceleration – scattering» cycles for gallium will be greater in comparison with silicon, and consequently, purification will be more effective. In the case of silicon, collisions with a heavy isotope occur on average every nine atoms, for gallium, approximately every two.

Estimation of the effect of purification from heavy isotopes of gallium crystals for superlattices can be obtained by mathematical modeling of the dependence of the energy levels on the width of the well. Thus, the value of the effective mass as a result of purification from heavy isotopes of gallium can be reduced by two times, i. e. to make the value $0,067/(2m_0)$. The value of the band gap after purification can be reduced by $0,06$ eV, i. e. become $1,424-0,06 = 1,364$ eV [7].

Pic. 3 presents the results of mathematical modeling of distribution of energy bands for SL from gallium arsenide and gallium arsenide aluminate without purification of gallium from heavy isotopes (Pic. 3a) and with purification (Pic. 3b).

Calculating the width of the energy gap in the quantum well for the parameters $a = b = 4$ nm has shown that purification reduces the width of the first energy gap by 3 meV, and this can be a significant factor for achieving a certain long-wavelength photoeffect boundary, for example, in safety systems, devices for detection of hazardous substances, product quality assessment, etc.

Thus, on the basis of mathematical modeling, changes in the optoelectronic characteristics (distribution of energy bands in SL structure) after purification of the material from heavy isotopes of gallium have been proved. With the help of isotopic SL, it is possible to design new semiconductor materials for ultra-long-range infrared photodetectors (an atmospheric window with a wavelength of light up to $20 \mu\text{m}$) that cannot be created in the usual way.

Conclusions. A change in the isotopic composition of the initial semiconductor affects the optoelectronic characteristics of the material (mobility of charge carriers, width of the band gap, quantum efficiency, etc.).

When creating isotopic materials, it is possible to increase or decrease the percentage of heavy isotopes in a substance. Thus, purification of gallium from heavy isotopes (gallium arsenide material of the photodetector) increases the signal-to-noise power ratio at the output of PD and reduces by several orders of magnitude the probability of error.

The most promising direction is creation of isotopic superlattices (new-generation nanostructures). On the basis of ISL, new semiconductor materials can be obtained for effective night vision devices (thermal imagers), solar batteries that capture dark photons, safety systems, medical equipment, etc.

In addition, isotopic purification of the original chemical element from heavy isotopes will allow creating more sensitive pixels of cameras and higher-quality (effective) video surveillance systems, photodetectors of ultra-long infrared range.

The studies have proved once again the effect of purification on the optoelectronic characteristics of a bulk functional material and, correspondingly, on the width of energy gaps in quantum structures (SL).

REFERENCES

1. Zhuravleva, L. M., Plekhanov, V. G. Perspectives of the application of isotopic nanoengineering in telecommunication systems. In: Successes of nanoengineering: electronics, materials, structures [Perspektivy primeneniya izotopicheskoy nanoinzhenerii v telekommunikatsionnykh sistemah // Uspehi nanoinzhenerii: elektronika, materialy, struktury]. Ed. by J. Davis, M. Thompson. Moscow, Technosfera publ., 2011, pp. 478–491.
2. Plekhanov, V. G., Zhuravleva, L. M. Isotopic creation of semiconductor graphene [Izotopicheskoe sozdanie poluprovodnikovogo grafena]. *Nanotehnika*, 2012, Iss. 3, pp. 34–38.
3. Press Release (2001) of Isonics Corporation, Golden, Colorado.
4. Zhuravleva, L. M., Malykh, A. N. Nanomaterials and Optoelectronics in High-Speed Communication Systems. *World of Transport and Transportation*, Vol. 14, 2016, Iss. 2, pp. 74–80.
5. Collins, A. T., Lawson, S. C., Davis, G., Kanda, H. Indirect energy gap of ^{13}C diamond. *Phys. Rev. Lett.* Published 13 August 1990.
6. Separation of isotopes [Razdelenie izotopov]. [Electronic resource]: http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Разделение_изотопов&oldid=62541612. Last accessed 05.04.2018.
7. Bogdanova, V. A., Davletkildееv, N. A., Semikolenova, N. A., Sidorov, E. N. Effective mass of electrons in heavily doped gallium arsenide in the ordering of impurity complexes [Effektivnaya massa elektronov v sil'no legirovannom arsenide galliya pri uporjadochenii primesnykh kompleksov] // Physics and Technology of Semiconductors. 2002, Vol. 36, pp. 407–411.
8. Rosencher, E., Vinter, B. Optoelectronics [Optoelektronika]. Moscow, Technosfera publ., 2006, 588 p.
9. Martinez-Duart, J. M. Nanotechnology for micro- and optoelectronics [Nanotehnologii dlja mikro-i optoelektroniki]. Moscow, Technosfera publ., 2007, 368 p.
10. Zhuravleva, L. M., Ivashevsky, M. R. [et al]. Evaluation of the quality of signal transmission of intelligent video surveillance systems [Ocenka kachestva peredachi signalov sistem intellektual'nogo videonabljudeniya]. *Proektirovanie i tehnologija elektronnykh sredstv*, 2017, Iss. 3, pp. 10–15.
11. Vereshchagin, I. K., Kokin, S. M., Nikitenko, V. A. [et al]. Physics of the solid body [Fizika tverdogo tela]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2001, 236 p.
12. Zhuravleva, L. M., Nikulina, Yu. A., Lebedeva, A. K. Prospects of Graphene Nanoelectronics. *World of Transport and Transportation*, Vol. 14, 2016, Iss. 1, pp. 72–78. ●

Information about the authors:

Zhuravlyova, Lyubov M. – D.Sc. (Eng), professor of Russian University of Transport, Moscow, Russia, zlyubov@mail.ru.

Ivashevsky, Mikhail R. – leading engineer of Moscow-Ryazan Regional Communication Center of Moscow Communications Directorate of Russian Railways JSC, Moscow, Russia, misha_13@mail.ru.

Muzafarov, Ildar F. – student of Russian University of Transport, Moscow, Russia, muz.il@yandex.ru.

Article received 12.03.2018, revised 15.04.2018, accepted 22.04.2018.

