



ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ AlN / GaN

Г. А. Мустафаев¹, В. А. Панченко¹,
А. Г. Мустафаев², Н. В. Черкесова¹

¹Кабардино-Балкарский государственный универ-
ситет, Нальчик

²Дагестанский государственный университет
народного хозяйства, Махачкала

Современные технологии создания гетероструктур на основе твердых растворов полупроводниковых нитридов позволяют получать высокоэффективные светоизлучающие диоды. Нитриды алюминия и галлия, а также твердые растворы на их основе являются перспективными материалами для оптоэлектронных устройств излучения в фиолетовой области спектра. Исследованы оптические свойства многослойной гетероструктуры на основе широкозонных полупроводников AlN / GaN. Моделирование проводилось с использованием математического пакета программ MathCad. Полученные результаты представляют интерес для промышленного формирования интегральных структур, излучающих на нескольких длинах волн. Создание такого источника позволяет увеличить дифференциальную квантовую эффективность светодиода в УФ-области спектра. Предложена структура источника излучения с длинами волны в окрестностях 278 и 317 нм.

Одним из перспективных путей увеличения выходной мощности светоизлучающих устройств является формирование многослойных последовательно интегрированных структур. Он реализуется технологией создания прибора в виде монолитной каскадной гетероструктуры с несколькими излучающими областями, выращенной в едином эпитаксиальном процессе. Интеграция отдельных лазерных структур осуществляется посредством туннельных переходов [1-5].

Эпитаксиальная интеграция гетероструктуры позволяет увеличить дифференциальную квантовую эффективность светодиода пропорционально количеству излучающих областей, обеспечить параллельность пучков излучения,

OPTICAL PROPERTIES OF AlN / GaN BASED HETEROSTRUCTURES

G. A. Mustafaev¹, V. A. Panchenko, A. G. Mustafaev²,
N. V. Cherkesova¹

¹Kabardino-Balkarian State University, Nalchik

²Dagestan State University of National Economy,
Makhachkala

Modern technology of forming heterostructures based on solid solutions of semiconductor nitrides, allows obtaining high-efficiency light-emitting diodes. Aluminum and gallium nitrides as well as solid solutions based on them are promising materials for optoelectronic devices in violet spectral region. Optical properties of a multilayer heterostructure based on wide-gap AlN / GaN semiconductors are studied. Modeling carried out using the mathematical software package MathCad. The results are of interest for industrial forming integrated structures emitting at several wavelengths. The creation of such a source allows you to increase the differential quantum efficiency of the LED in the UV region of the spectrum. Developed the structure of source with radiation wavelengths near 278 and 317 nm.

One of the promising ways to increase the output power of light-emitting devices is the formation of multilayer sequentially integrated structures. It is implemented by creating a device in the form of a monolithic cascade heterostructure with several radiating regions, grown in a single epitaxial process. The integration of individual laser structures is carried out through tunnel junctions [1-5].

Epitaxial integration of the heterostructure allows to increase the differential quantum efficiency of the LED in proportion to the number of radiating regions, to ensure parallelism of radiation beams, to significantly reduce the distance between the radiating regions, to reduce the sequential resistance of devices [6-8]. Along with the listed advantages, this approach has a significant limitation. It consists in increased heat emission of several closely located radiating regions in comparison with traditional devices with one radiating region.

In this work, we determined the optical properties of a multilayer heterostructure based on

существенно сократить расстояние между излучающими областями, снизить последовательное сопротивление приборов [6–8]. Наряду с перечисленными достоинствами данный подход обладает и существенным ограничением. Он заключается в увеличенном тепловыделении нескольких близко расположенных излучающих областей по сравнению с традиционными приборами с одной излучающей областью.

В данной работе определены оптические свойства многослойной гетероструктуры на основе широкозонных полупроводников AlN/GaN. Цель исследования – создание прибора, излучающего несколько длин волн, совокупность которых может позволить увеличить дифференциальную квантовую эффективность светодиода в ультрафиолетовой области спектра. Схематически исследуемая гетероструктура показана на рис. 1. На подложке из AlN методом молекулярно-лучевой эпитаксии последовательно формируются слои GaN и AlN. В результате получается симметричная структура, состоящая из трех ям, разделенных барьерами AlN. Толщина барьерных слоев составляет 1,8 нм. Толщина слоев GaN составляет 2,1; 4,2; 2,1 нм соответственно.

Исходные данные (эффективные массы носителей, ширина запрещенной зоны материалов и др.) для расчетов были взяты из тематической базы данных института им. А. Ф. Иоффе [9]. В расчетах учитывалось, что в системе AlN/GaN разрыв зоны проводимости составляет около 2 эВ, а разрыв валентной зоны – около 0,7 эВ.

Как видно из рис. 1, профиль потенциальной энергии изменяется вдоль координаты перпендикулярной поверхности структуры. Разобьем интересующий нас диапазон координат на малые интервалы, в пределах которых будем считать потенциал постоянным. Волновую функцию электрона запишем в виде суперпозиции плоских волн, распространяющихся в противоположных направлениях:

$$\psi(z) = A_1 e^{jk_i(z-z_i)} + B_1 e^{-jk_i(z-z_i)},$$

где $k_i = \frac{\sqrt{2m_i(E_n - U(z_i))}}{h}$ – волновой вектор электрона.

Амплитуды падающей A_1 и отраженной B_1 волн первого слоя примем за +1 и -1 соответственно и вычислим амплитуды во всех последующих слоях с помощью матрицы переноса. В результате можно получить уравнение для волновой функции электрона на выходе струк-

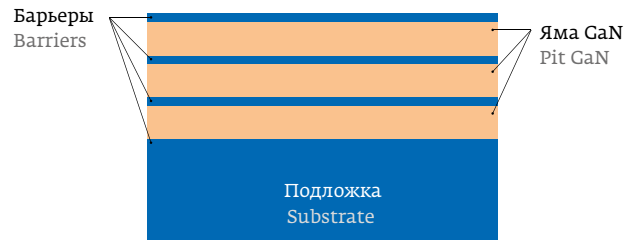


Рис. 1. Гетероструктура, состоящая из ям на основе GaN, разделенных узкими барьерами из AlN

Fig. 1. Heterostructure consisting of GaN-based pits separated by narrow AlN barriers

wide-gap AlN/GaN semiconductors. The purpose of the study is to create a device emitting several wavelengths, the combination of which may allow an increase in the differential quantum efficiency of a LED in the ultraviolet region of the spectrum. A schematically investigated heterostructure is shown in Fig. 1. On an AlN substrate, by the method of molecular beam epitaxy, layers of GaN and AlN are sequentially formed. The result is a symmetric structure consisting of three wells separated by AlN barriers. The thickness of the barrier layers is 1.8 nm. The thickness of the GaN layers is 2.1; 4.2; 2.1 nm, respectively.

The initial data (effective masses of carriers, the width of the energy gap of materials, etc.) for calculations were taken from the thematic database of the A. F. Ioffe Institute [9]. The calculations took into account that, in the AlN/GaN system, the conduction band gap is about 2 eV, and the valence band gap is about 0.7 eV.

As can be seen from Fig. 1, the potential energy profile changes along the coordinate perpendicular to the surface of the structure. We divide the concerned range of coordinates into small intervals, within which we will consider the potential constant. The wave function of the electron is expressed in the form of a superposition of plane waves propagating in opposite directions:

$$\psi(z) = A_1 e^{jk_i(z-z_i)} + B_1 e^{-jk_i(z-z_i)},$$

where $k_i = \frac{\sqrt{2m_i(E_n - U(z_i))}}{h}$ is the electron wave vector.

The amplitudes of the incident A_1 and reflected B_1 waves of the first layer are taken as +1 and -1,

туры, по которому можно вычислить значения энергии уровней квантования в квантовых ямах. На рис. 2 приведена зависимость квадрата модуля волновой функции электрона от координаты для гетероструктуры, представленной на рис. 1.

Расчеты показывают, что энергия первых четырех уровней квантования структуры является величиной комплексной и имеет следующие значения:

$$E_1 = 0,214 - 1,201 \cdot 10^{-11} i;$$

$$E_2 = 0,306 + 2,124 \cdot 10^{-12} i;$$

$$E_3 = 0,693 - 4,188 \cdot 10^{-12} i;$$

$$E_4 = 1,235 + 1,935 \cdot 10^{-20} i.$$

Отсчет ведется от дна ямы. Из рис. 2 видно, что частицы, имеющие энергии, соответствующие уровням квантования, локализируются в центральной яме. Квадрат модуля мнимой части комплексного числа, выражающего энергию уровня квантования, пропорционален концентрации носителей на данном уровне. По вычисленным значениям энергии были оценены относительные концентрации носителей на соответствующих уровнях квантования. Расчеты показывают, что в структуре электронами преимущественно будут заселены 3 и 4 уровни энергии в яме.

Аналогичные расчеты были проведены для случая движения дырок в валентной зоне данной структуры. В этом случае локализация дырок наблюдается также в области центральной ямы, а энергии первых четырех уровней квантования имеют следующие значения:

$$E_1 = 0,018 - 8,320 \cdot 10^{-13} i;$$

$$E_2 = 0,015 - 1,901 \cdot 10^{-14} i;$$

$$E_3 = 0,168 + 1,268 \cdot 10^{-12} i;$$

$$E_4 = 0,307 + 2,849 \cdot 10^{-11} i.$$

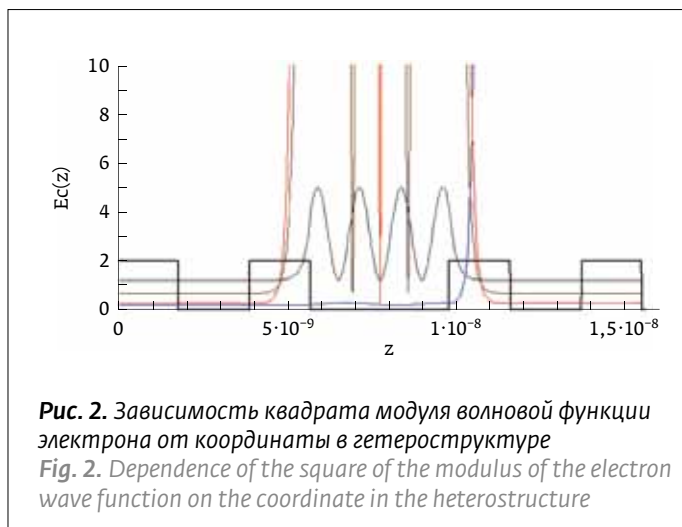


Рис. 2. Зависимость квадрата модуля волновой функции электрона от координаты в гетероструктуре
Fig. 2. Dependence of the square of the modulus of the electron wave function on the coordinate in the heterostructure

respectively, and we calculate the amplitudes in all subsequent layers using the transfer matrix. As a result, one can obtain an equation for the electron wave function at the output of the structure, from which one can calculate the values of the energy of quantization levels in quantum wells. Figure 2 shows the dependence of the square of the modulus of the electron wave function on the coordinate for the heterostructure shown in Fig. 1.

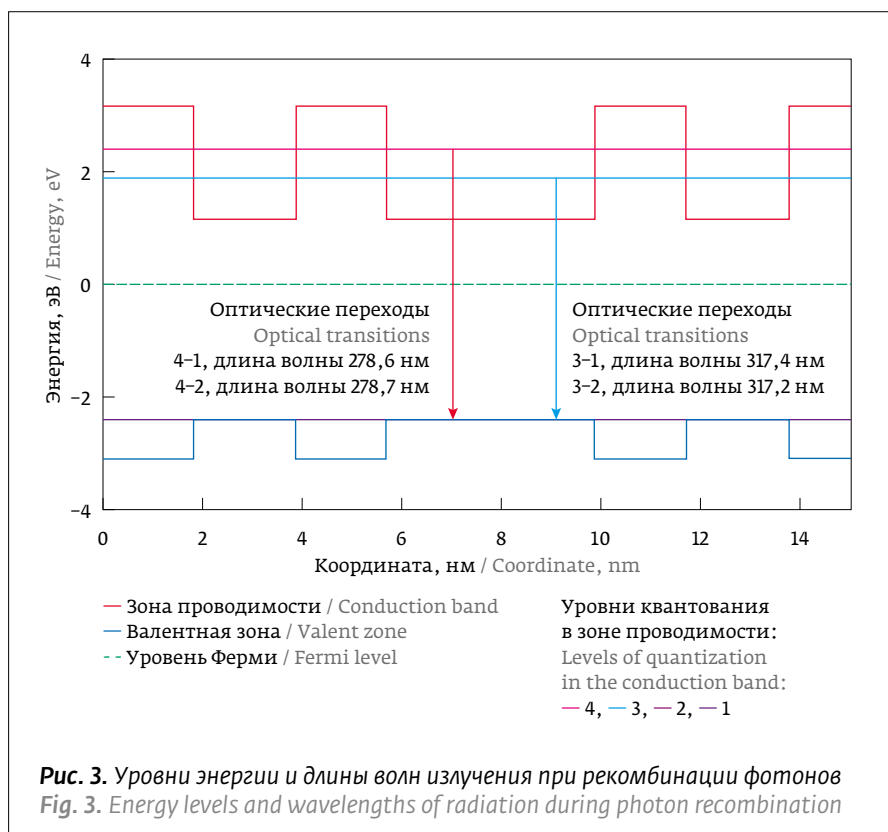


Рис. 3. Уровни энергии и длины волн излучения при рекомбинации фотонов
Fig. 3. Energy levels and wavelengths of radiation during photon recombination



Отсчет, как и в случае электронов, ведется от дна ямы. Расчет относительной концентрации носителей на уровнях показывает, что дырки преимущественно заселяют первый и второй уровень квантования.

Далее был проведен расчет энергии фотонов при рекомбинации электронов и дырок в области центральной ямы структуры. Вычисленные значения уровней энергии в зоне проводимости и валентной зоне, а также длины волн излучения при возможных оптических переходах приведены на рис. 3.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что предложенная структура является потенциальным источником излучения в окрестностях 278 и 317 нм и может быть использована при формировании высокоэффективных светоизлучающих устройств ультрафиолетового диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Casey Jr. H. C., Panish M. B.** Heterostructure Lasers, Part A // New York: Academic Press, 1978.
2. **Garcia J. Ch., Rosencher E., Collot Ph. et al.** Epitaxially stacked lasers with Esaki junctions: A bipolar cascade laser // Appl. Phys. Lett., 1998, v.71, p.3752.
3. **Baia J., Wang T., Comming P., Parbrook P. J. et al.** Optical properties of AlGaIn / GaInAlGaIn / GaIn multiple quantum well structure by using a high-temperature AlN buffer on sapphire substrate // Journal of Applied Physics, 2006, v. 99, p.023513.
4. **Wang Q., Wang T., Bai J. et al.** Growth and optical investigation of self-assembled InGaIn quantum dots on a GaIn surface using a high temperature AlN buffer // Journal of Applied Physics, 2008, v.103, p.123522.
5. **Alekseev A. N., Aleksandrov S. B., Byrnaz, A. É. et al.** Multilayer AlN / AlGaIn / GaIn / AlGaIn heterostructures with quantum wells for high-power field-effect transistors grown by ammonia MBE // Tech. Phys. Lett., 2006, v. 32, p. 960.
6. **Van der Ziel J. P., Tsang W. T.** Integrated multilayer GaAs lasers separated by tunnel junctions // Appl. Phys. Lett., 1982, v.41, p.499.
7. **Мармалюк А. А., Давыдова Е. И., Зверков М. В. и др.** Лазерные диоды с несколькими излучающими областями ($\lambda = 800\text{--}1100$ нм) на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур // Физика и техника полупроводников, 2011, т. 45, № 4, с. 528–534.
Marmalyuk A. A., Davydova E. I., Zverkov M. V. et al. Lazernye diody s neskol'kimi izluchayushchimi oblastyami ($\lambda = 800\text{--}1100$ nm) na osnove ehpitaksial'no-integrirrovannykh geterostruktur // Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 2011, v. 45, № 4, p.528–534.
8. **Patterson S. G., Petrich G. S., Ram R. J., Kolodziejski L. A.** Continuous-wave room temperature operation of bipolar cascade laser // Electronics Letters, 1999, v.35, № 5, p.395–397.
9. Параметры полупроводниковых гетероструктур // URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond>.
Parametry poluprovodnikovoyh geterostruktur // URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond>.

Calculations show that the energy of the first four levels of quantization of a structure is a complex value and has the following values:

$$E_1 = 0,214 - 1,201 \cdot 10^{-11} \text{ i};$$

$$E_2 = 0,306 + 2,124 \cdot 10^{-12} \text{ i};$$

$$E_3 = 0,693 - 4,188 \cdot 10^{-12} \text{ i};$$

$$E_4 = 1,235 + 1,935 \cdot 10^{-20} \text{ i}.$$

The countdown is from the bottom of the pit. From Fig. 2, it is seen that particles with energies corresponding to quantization levels are localized in the central well. The square of the module of the imaginary part of the energy of the quantization level is proportional to the carrier concentration at this level. Based on the calculated energy values, the relative carrier concentrations were estimated at the corresponding quantization levels. Calculations show that in the structure, 3 and 4 energy levels in the pit will be predominantly populated by electrons.

Similar calculations were performed for the case of the motion of holes in the valence band of this structure. In this case, hole localization is also observed in the region of the central well, and the energies of the first four quantization levels have the following meanings:

$$E_1 = 0,018 - 8,320 \cdot 10^{-13} \text{ i};$$

$$E_2 = 0,015 - 1,901 \cdot 10^{-14} \text{ i};$$

$$E_3 = 0,168 + 1,268 \cdot 10^{-12} \text{ i};$$

$$E_4 = 0,307 + 2,849 \cdot 10^{-11} \text{ i}.$$

The countdown is done from bottom of the pit. The calculation of the relative carrier concentration at the levels shows that the holes mainly populate the first and second quantization levels.

Next, the photon energy was calculated for the recombination of electrons and holes in the region of the central pit of the structure. The calculated values of the energy levels in the conduction and valence bands, as well as the radiation wavelengths at possible optical transitions are shown in Fig. 3.

Thus, the calculations show that the proposed structure is a potential source of radiation in the vicinity of 278 and 317 nm and can be used in the formation of high-performance light-emitting devices in the ultraviolet range.