

УДК 621.383.4/5

## Оптические свойства гетероэпитаксиальных слоёв AlGa<sub>x</sub>N

А.В. Никонов, К.О. Болтарь, Н.И. Яковлева

*Проведено исследование температурной зависимости ширины запрещенной зоны AlGa<sub>x</sub>N. Разработаны и построены модели показателя преломления и коэффициента поглощения AlGa<sub>x</sub>N. Разработана методика моделирования спектров УФ-пропускания по профилям состава многослойных гетероэпитаксиальных структур AlGa<sub>x</sub>N.*

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

*Ключевые слова:* AlGa<sub>x</sub>N, ультрафиолетовый спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры, показатель преломления, спектры пропускания.

### Введение

Возможность контролировать ширину запрещенной зоны и формирование гетеропереходов делают материал тройного соединения Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N наиболее пригодным и легко приспособляемым решением для создания матричных фотодетекторов ультрафиолетового излучения [1–4], в т.ч. «солнечно-слепых» (фотодетекторы с минимальным откликом на длине волны 240–290 нм) [5].

Эффективной методикой контроля характеристик материала, таких как толщина слоя, состав материала, однородность состава по толщине, является анализ оптических свойств: спектров поглощения, пропускания и отражения. Ключевыми константами полупроводниковых материалов, влияющими на оптические свойства, являются показатель преломления и коэффициент поглощения.

Зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения AlGa<sub>x</sub>N изучались зарубежными исследователями [6–8]. Проведены экспериментальные исследования оптических характеристик отдельных образцов материала, на основании которых получены эмпирические зависимости. Однако полученные результаты не позволяют в достаточной мере учесть особенности многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе AlGa<sub>x</sub>N.

В данном исследовании проведен анализ существующих моделей показателя преломления и коэффициента поглощения AlGa<sub>x</sub>N, разработаны теоретические модели показателя преломления и коэффициента поглощения для материала AlGa<sub>x</sub>N различного состава, дополняющие и улучшающие результаты экспериментальных исследований. Проведено исследование зависимости ширины

запрещенной зоны от состава материала и температуры измерений.

### Модель показателя преломления AlGa<sub>x</sub>N

Показатель преломления является ключевой константой материала, влияющей на его оптические свойства. В рамках данной работы проведено исследование и моделирование зависимости показателя преломления материала от ширины запрещенной зоны. Модель описывается уравнением дисперсии Sellmeiera первого порядка [6]:

$$n(\lambda)^2 = 1 + \frac{A_0 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2},$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения;  $A_0$ ,  $\lambda_0$  – настраиваемые параметры, зависящие от ширины запрещенной зоны:

$$A_0(E_g) = B_0 + B_1 E_g + B_2 E_g^2,$$

$$\lambda_0(E_g) = C_0 + C_1 E_g + C_2 E_g^2,$$

с соответствующими коэффициентами  $B_0 = 6,626$ ,  $B_1 = -0,934$ ,  $B_2 = 0,0598$ ,  $C_0 = 396,8$ ,  $C_1 = -84,12$ ,  $C_2 = 6,758$ .

Проведено моделирование показателя преломления AlGa<sub>x</sub>N при различных составах материала. Результаты моделирования представлены на рис. 1. При увеличении доли алюминия в полупроводниковом материале показатель преломления уменьшается.

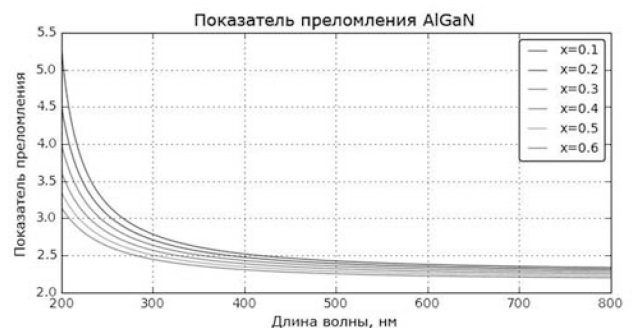


Рис. 1. Зависимость показателя преломления от длины волны при различных значениях состава Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N и T=300 К.

Никонов Антон Викторович, инженер, аспирант\*.  
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК, профессор\*.  
Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ, ОАО «НПО «Орион»».  
Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.  
Тел.: (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru  
\*Московский физико-технический институт  
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2014 г.  
© Никонов А.В., Болтарь К.О., Яковлева Н.И., 2014

Ширина запрещённой зоны тройного соединения  $Al_xGa_{1-x}N$  аппроксимируется с помощью квадратичной зависимости от его состава [7]:

$$E_g = 6,13x + 3,42(1-x) - 1,08x(1-x).$$

Эффективной методикой исследования температурной зависимости ширины запрещённой зоны является использование уравнения Варшны:

$$E_g(x, T) = \left[ E_g(x, 300K) + 69,5meV \right] - \alpha \frac{T^2}{\beta + T},$$

где  $\alpha = 8,73 \cdot 10^{-4}$  эВ/К – температурный коэффициент изменения ширины запрещённой зоны,  $\beta = 830$  К – температура Дебая.

Зависимость ширины запрещённой зоны тройного соединения AlGaN от состава и температуры позволяет оценить влияние изменения температуры на показатель преломления материала. Рис. 2 демонстрирует результаты моделирования показателя преломления AlGaN при различных значениях температуры.

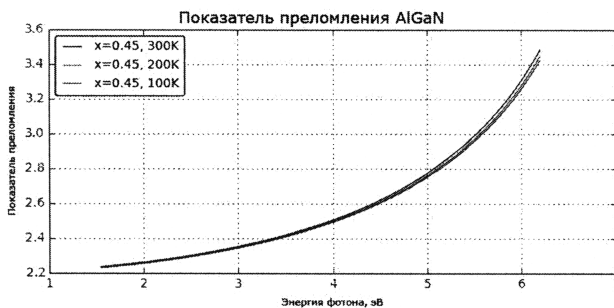


Рис. 2. Зависимость показателя преломления от энергии фотона при различных значениях температуры (100 К, 200 К, 300 К) для  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$ .

### Численная модель коэффициента поглощения AlGaN

В ходе исследования разработана и построена численная модель коэффициента поглощения AlGaN в зависимости от состава  $x$  и энергии падающего излучения. Модель представляет собой экспоненциальную зависимость, три линейных функции модели сшиты с помощью полиномов Лагранжа:

$$\lg \alpha = \begin{cases} A_1 \cdot h\nu + C_1, & h\nu \leq 3,683 - 4,676 \cdot x \\ L_1(h\nu, x), & 3,683 - 4,676 \cdot x < h\nu \leq 3,843 - 4,676 \cdot x \\ A_2 \cdot h\nu + C_2, & 3,843 - 4,676 \cdot x < h\nu \leq 4,067 - 4,870 \cdot x \\ L_2(h\nu, x), & 4,067 - 4,870 \cdot x < h\nu \leq 4,147 - 4,870 \cdot x \\ A_3 \cdot h\nu + C_3, & 4,147 - 4,870 \cdot x < h\nu \end{cases}$$

Здесь  $A_1, A_2, A_3, C_1, C_2, C_3$  – коэффициенты, зависящие от состава  $x$ ;  $L_1(h\nu, x), L_2(h\nu, x)$  – полиномы Лагранжа, которые задаются формулами:

$$L(h\nu, x) = \sum_{i=1}^9 b_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^9 \frac{h\nu - a_j}{a_j - a_i}$$

с соответствующими подобранными для каждого полинома коэффициентами  $a_j, b_j$ .

Результаты моделирования зависимости коэффициента поглощения гетероэпитаксиальных структур на основе AlGaN от энергии падающего излучения при различных составах представлены на рис. 3.

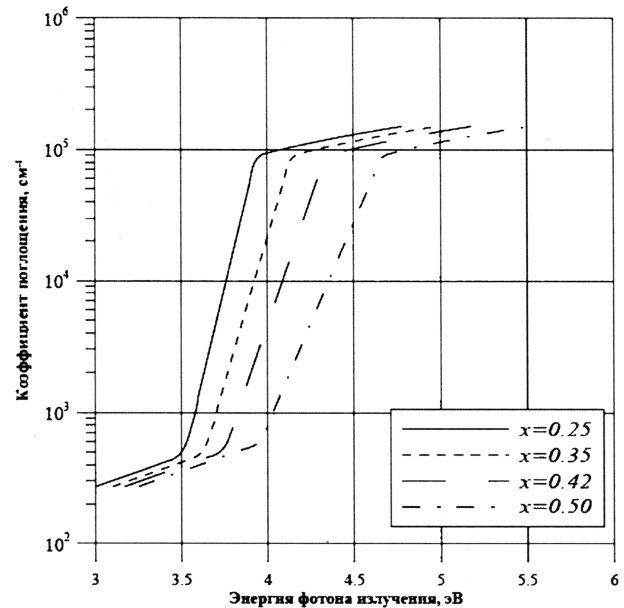


Рис. 3. Модель зависимости коэффициента поглощения ГЭС  $Al_xGa_{1-x}N$  от энергии фотона излучения при различных составах материала.

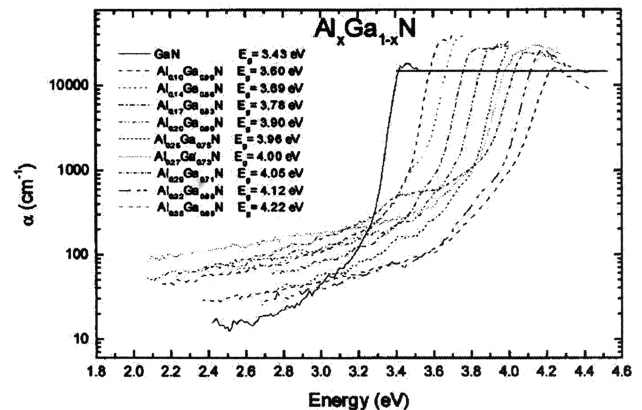


Рис. 4. Коэффициент поглощения  $Al_xGa_{1-x}N$ , измеренный методом спектроскопии фототеплового отклонения при  $T = 300$  К.

Разработанная модель демонстрирует свою эффективность для анализа сложных гетероэпитаксиальных структур на основе AlGaN с толщиной отдельных слоёв в несколько сотен нанометров и находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными из независимых источников [8]. На рис. 4 показаны результаты измерения коэффициента поглощения методом спектроскопии фототеплового отклонения при температуре 300 К для составов материала  $x = 0 \dots 0,35$  [8]. Ключевой особенностью представленных спектров поглощения является резкое изменение значений коэффициента поглощения при энергиях фотонов, близких к ширине запрещённой зоны. Такое изменение наглядно демонстрирует оптические характеристики эпитаксиальных слоёв AlGaN.

## Исследование спектров пропускания ГЭС на основе AlGaN

Разработанные в ходе исследования модели показателя преломления и коэффициента поглощения AlGaN используются для моделирования спектров пропускания сложных гетероэпитаксиальных структур на основе AlGaN. Параметры слоёв типичной гетероструктуры, используемой для изготовления УФ фотодетекторов, представлены на рис. 5.

Образец №797 Гетероструктуры для УФ фотодетекторов

Контактный слой	GaN, $N_p = 8.0e+10^{16}$	200 nm
Слой p	$Al_{x=0.10}GaN$ , $N_p = 5.0e+10^{15}$	1000 nm
Поглощающий слой	$Al_{x=0.10}GaN$ , $N_a = 5.0e+10^{14}$	1000 nm
Фильтр	$Al_{x=0.28}GaN$ , $N_p = 1.0e+10^{18}$	200 nm
Буфер	AlN	150 nm
Сапфировая подложка	$Al_2O_3$	430 mkm

Рис. 5. Параметры гетероэпитаксиальной структуры на основе AlGaN (образец № 797).

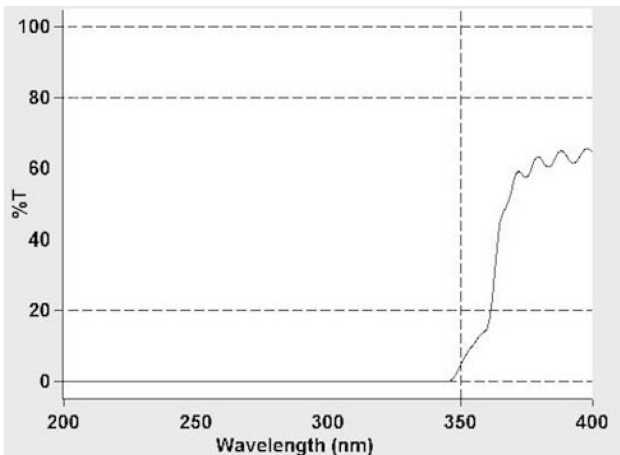


Рис. 6. Экспериментальный спектр пропускания гетероструктуры (образец № 797).

Использование матричной модели Абея [9], которая включает в себя разработанные в данном исследовании модели показателя преломления и коэффициента поглощения AlGaN, позволяет проводить исследования спектров пропускания сложных УФ-гетероструктур. Ис-

следования включают в себя две задачи: по известным характеристикам (составу и толщине) слоёв строится модель спектра пропускания структуры, а также по экспериментально полученному спектру пропускания методом вариации параметров вычисляются характеристики структуры, сравнивая экспериментально полученные и теоретически построенные данные. На рис. 6 показан типичный спектр пропускания гетероструктуры на основе AlGaN.

## Заключение

Разработаны и построены модели показателя преломления и коэффициента поглощения. Модели демонстрируют свою эффективность для анализа гетероэпитаксиальных структур на основе AlGaN с толщиной отдельных слоёв в несколько сотен нанометров и находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными из независимых источников.

Полученные в работе модели показателя преломления и коэффициента поглощения в совокупности с оптическим методом контроля пропускания позволяют моделировать спектры пропускания гетероэпитаксиальных структур на основе AlGaN при заданном распределении состава по толщине и известной толщине рабочего фоточувствительного слоя, а также вычислять параметры структур по экспериментально полученным спектрам пропускания.

## Литература

1. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010.
2. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
3. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Яковлева Н.И. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
4. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Филачёв А.М. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 54.
5. Болтарь К.О. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 71.
6. Ozgur U., Webb-Wood G., Everitt H. // Applied Physics Letters. 2001. V. 79. No. 25. P. 4103.
7. Monroy E., Calle F., Pau J.L., et al. // Journal of Applied Physics. 2000. V. 88. No. 4. P. 2081.
8. Omnes F., Marengo N., Beaumont B., et al. // Journal of Applied Physics. 1999. V. 86. No. 9. P. 5286.
9. Никонов А.В., Болтарь К.О., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 100.

## Optical properties of the CdHgTe heteroepitaxial layers

A. V. Nikonov<sup>1,2</sup>, K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, and N. I. Yakovleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association  
46/2 Entuziastov highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology,  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

*Received March 10, 2014*

***Temperature dependence of AlGaIn band gap energy was investigated. Refractive index model and absorption coefficient models were developed and plotted in dependence of AlGaIn parameters. UV-transmission spectra model based on absorption coefficient and characteristics (thickness and composition of layers) of multilayer AlGaIn heterostructures was developed.***

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

*Keywords:* AlGaIn, ultraviolet spectral range, heteroepitaxial structures, refractive index, transmission spectrum.

### References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, N. I. Yakovleva, et al., *Uspekhi Prikladnou Fiziki* **1**, 344 (2013).
4. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 54 (2013).
5. K. O. Boltar et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 71 (2013).
6. U. Ozgur, G. Webb-Wood, and H. Everitt, *Applied Physics Letters* **79**, 4103 (2001).
7. E. Monroy, F. Calle, J.L. Pau, et al., *Journal of Applied Physics* **88**, 2081 (2000).
8. F. Omnes, N. Marenco, B. Beaumont, et al., *Journal of Applied Physics*. **86**, 5286 (1999).
9. A. V. Nikonov, K. O. Boltar, and N. I. Yakovleva, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 100 (2011).