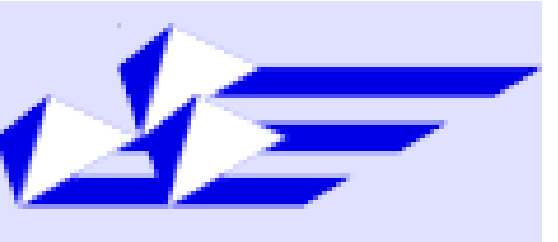


# ИОННО-ИМПЛАНТАЦИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ GaAs ВИСМУТОМ



О.В. Вихрова<sup>1</sup>, Ю.А. Данилов<sup>1</sup>, Ю.А. Дудин<sup>1</sup>, Д.А. Здравейцев<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>1</sup>,  
А.Е. Парафин<sup>2</sup>, Е.А. Питиримова<sup>1</sup>, С.М. Планкина<sup>1</sup>



<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия

e-mail: pitirimova@phys.unn.ru

## Мотивация

Висмут является изовалентной примесью при замещении атомов As в решетке GaAs. Легирование атомами Bi (обычно методами эпитаксии) приводит к уменьшению запрещенной зоны GaAs и к увеличению спин-орбитального взаимодействия.

## Методика эксперимента

В качестве исходного материала взяты полированные пластины полупроводящего GaAs(001). Для оптических исследований использованы пластины с двухсторонней полировкой.

Облучение производилось при комнатной температуре мишени на ускорителе «Радуга-3М» с использованием в качестве источника металлической пластины Bi. Ускоряющее напряжение составляло 30 или 80 кВ, а доза соответствовала средней концентрации атомов Bi в имплантированном слое 0.5, 1 и 1.5 ат.%. После имплантации ионов Bi выполнялся быстрый термический отжиг (БТО) при 800°C в течение 20 с или отжиг импульсом эксимерного лазера KrF.

После имплантации ионов Bi выполнялся быстрый термический отжиг (БТО) при 800°C в течение 20 с или отжиг импульсом эксимерного лазера KrF.



Установка JetFirst-100: отжиг проводился в потоке чистого Ar. Пластины помещались рабочей стороной вниз к Si подложке.

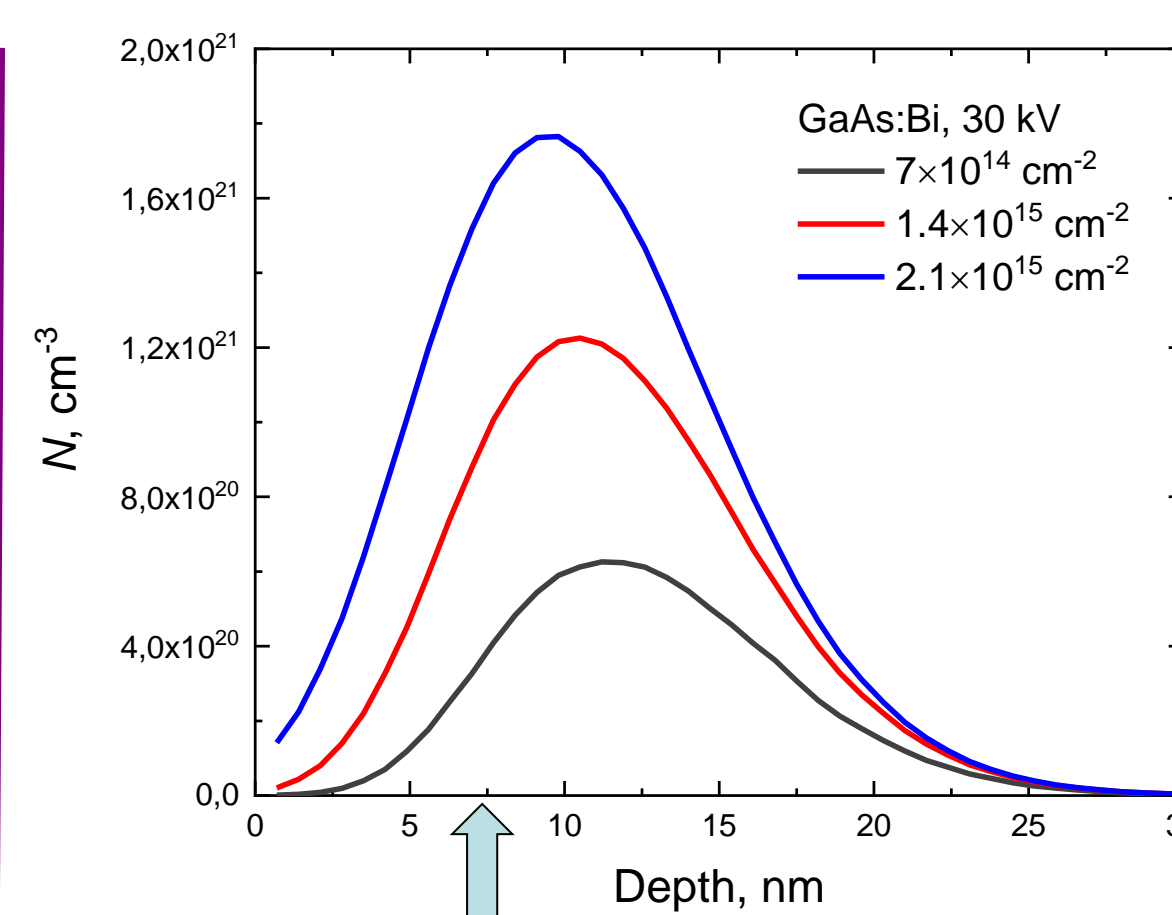
Для ИЛО использован KrF лазер LPX-200 с длиной волны 248 нм и длительностью импульса 30 нс. Энергия в импульсе варьировалась от 200 до 400 мДж/см<sup>2</sup>.



## Методы исследования

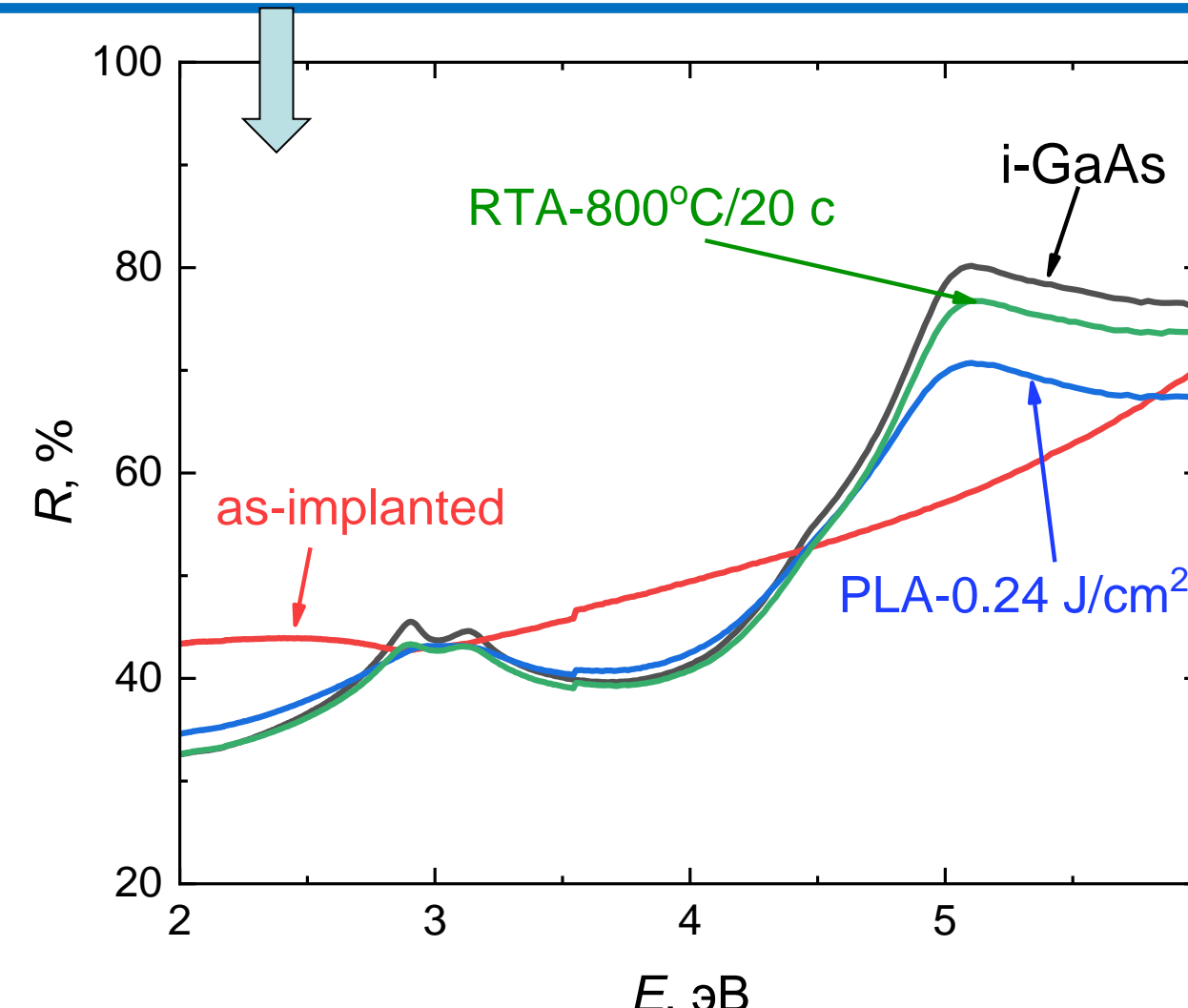
- 1) Для исследования кристаллической структуры использовался электронограф ЭМР-102 в режиме „на отражение“ при скользящем угле падения и ускоряющем напряжении 50 кВ;
- 2) Оптические свойства образцов в диапазоне длин волн от 0.18 до 1.8 мкм исследовались с помощью спектроскопии отражения при почти нормальном падении и пропускания с использованием двухлучевого спектрофотометра Cary 6000i (Varian).
- 3) Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследовались на комплексе NTEGRA Spectra производства NT-MDT с применением лазера с длиной волны 473 нм. Исследование спектров КРС проводилось в геометрии обратного рассеяния. Спектроскопия КРС осуществлялась в диапазоне 50–900 см<sup>-1</sup> с разрешением 0.7 см<sup>-1</sup>. Все спектры были получены при комнатной температуре.
- 4) Измерения эффекта Холла выполнены на установке Nanometrics HL5500 с использованием геометрии Ван-дер-Пау.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект №23-29-00312).



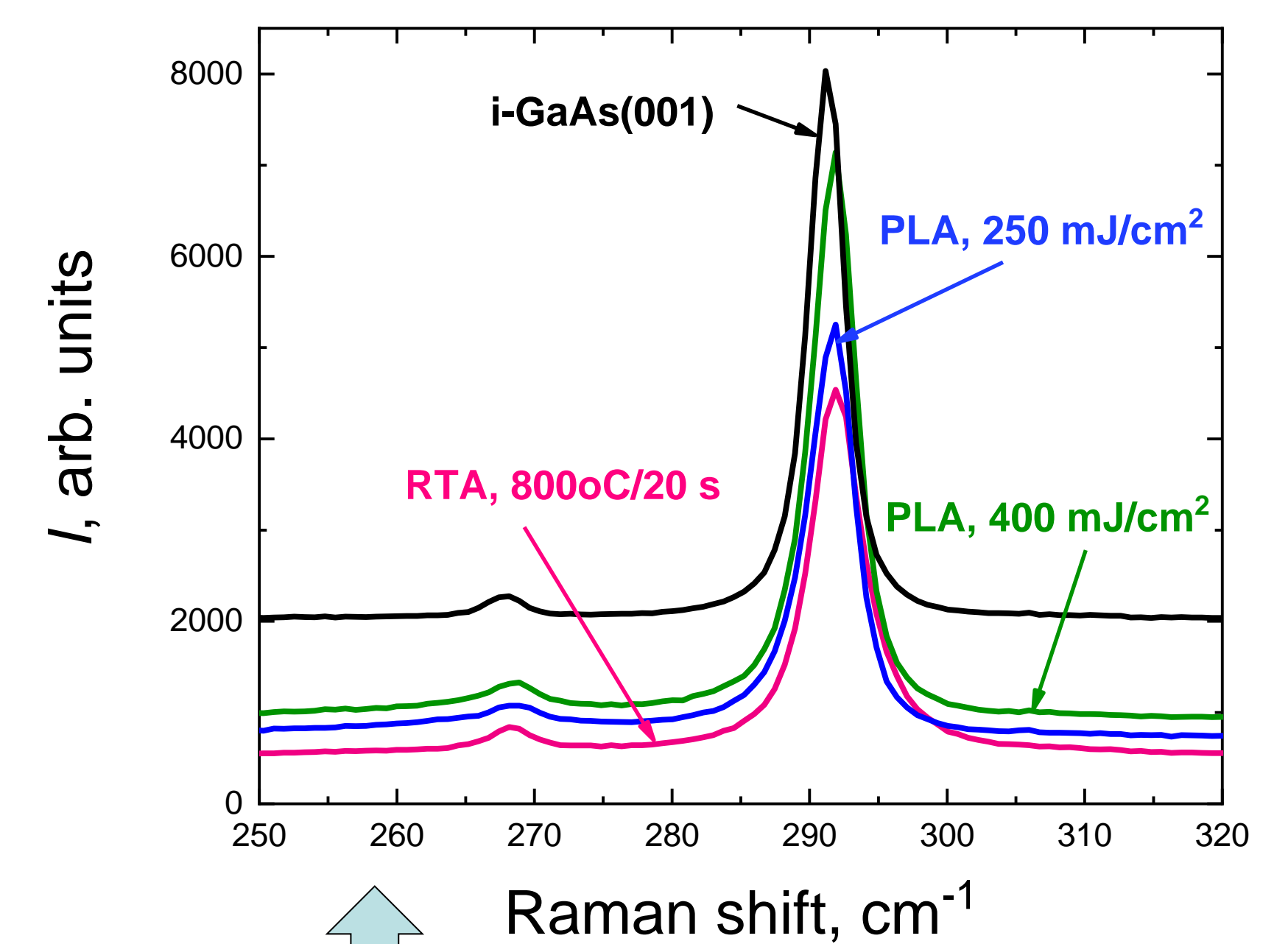
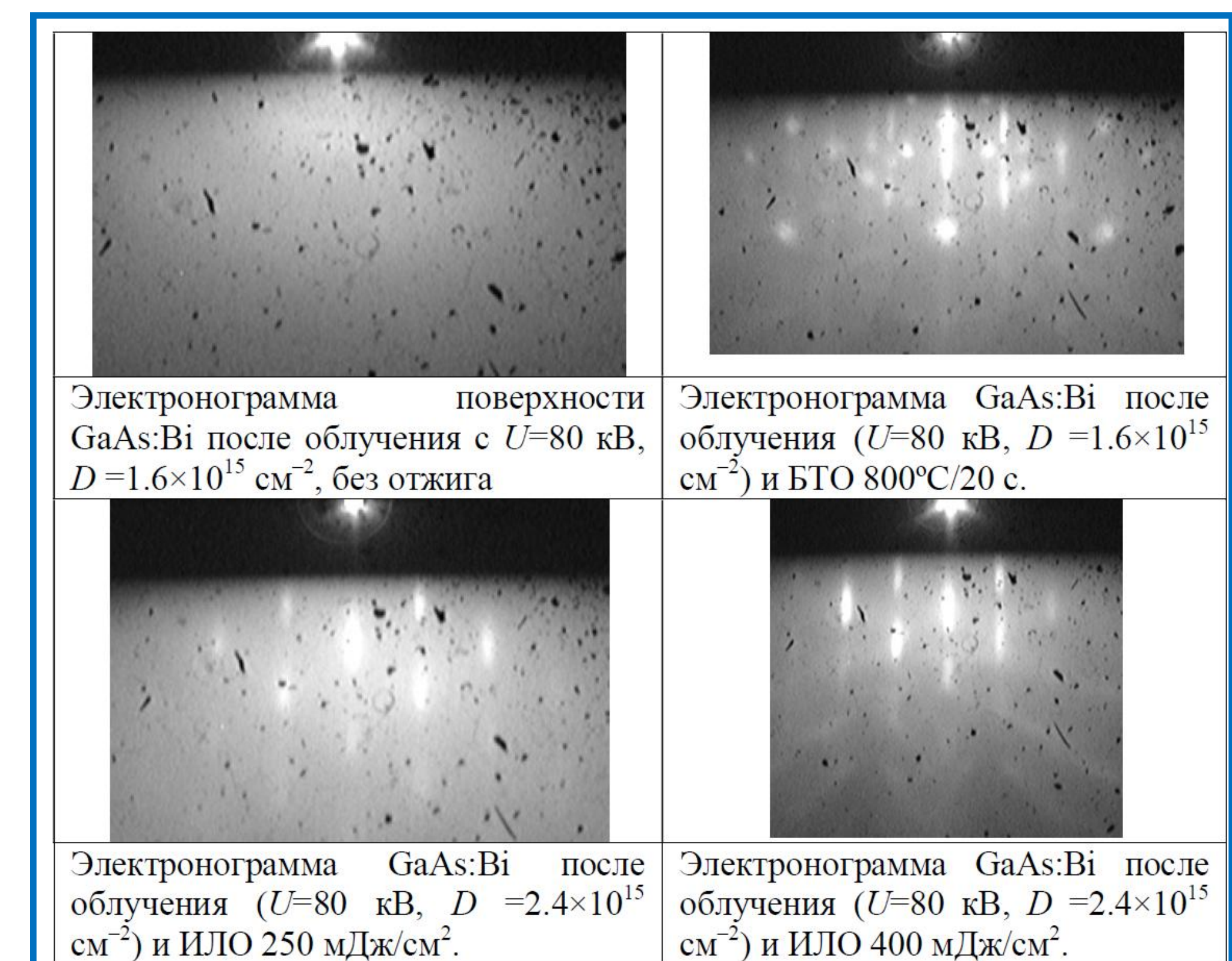
**Расчет распределения атомов Bi в GaAs при имплантации с U = 30 кВ при варьировании дозы имплантации. Расчет проведен с учетом коэффициента распыления S = 12.5.**

**Спектры отражения GaAs, облученного ионами Bi с U = 30 кВ и D = 1.4x10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> после имплантации (красная кривая), после имплантации и БТО 800°C/20с (зеленая кривая) и ИЛО 240 мДж/см<sup>2</sup> (синяя кривая). Приведен также спектр для монокристаллического i-GaAs.**



## Экспериментальные результаты

### Структура слоев GaAs, подвергнутых имплантации ионов Bi и отжигу

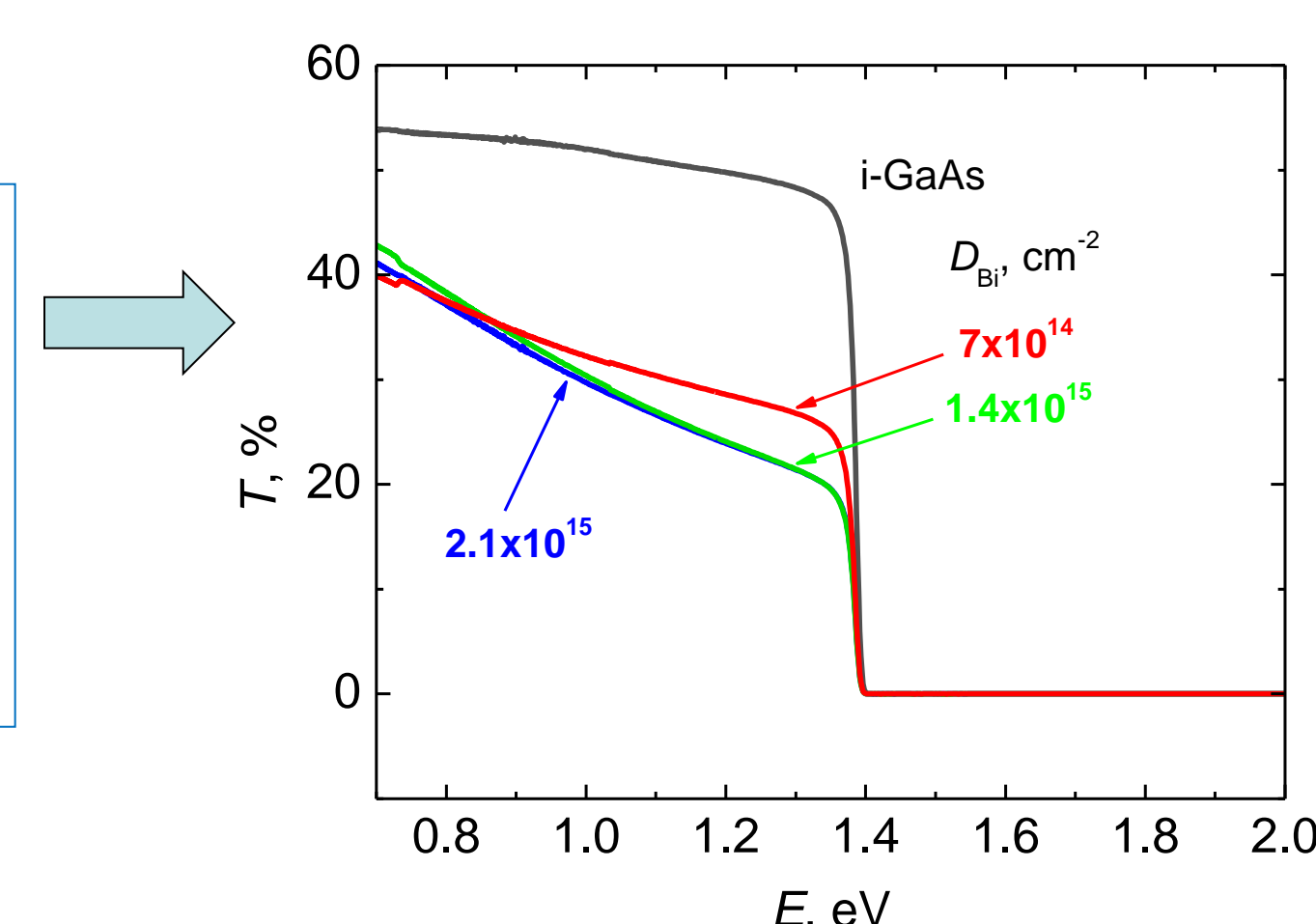


**Спектры КРС образцов GaAs:Bi, облученных с U=80 кВ, D=2.4x10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>, после разных видов отжига**

**Слоевые электрические параметры для GaAs:Bi (U = 30 кВ, D<sub>Bi</sub> = 1.4x10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>)**

Образец	Тип проводимости	R <sub>s</sub> , Ом/□	n(p) <sub>s</sub> , см <sup>-2</sup>	μ <sub>эф</sub> , см <sup>2</sup> /В·с
as implanted	n	1.45 · 10 <sup>6</sup>	3.6 · 10 <sup>12</sup>	1.2
БТО - 800°C/20 с	p	9.8 · 10 <sup>6</sup>	1.2 · 10 <sup>10</sup>	54
ИЛО - 240 мДж/см <sup>2</sup>	n	1.63 · 10 <sup>7</sup>	8.7 · 10 <sup>10</sup>	4.4

**Спектр пропускания образца GaAs:Bi после имплантации при U = 30 кВ с различными дозами после БТО - 800°C/20с**



$$\alpha_{\text{слой}} d_{\text{слой}} = \ln\left(\frac{T_{\text{подложки}}}{T_{\text{слой}}}\right)$$

D <sub>Bi</sub> , см <sup>-2</sup>	Расчетное содержание Bi, ат.%	E <sub>g</sub> , эВ
0	0	1.424
7x10 <sup>14</sup>	1	1.398
1.4x10 <sup>15</sup>	2	1.386
2.1x10 <sup>15</sup>	3	1.373

**Выводы:** быстрый термический отжиг при 800°C и импульсный лазерный отжиг при 240 мДж/см<sup>2</sup> приводят к восстановлению кристаллической структуры GaAs, облученного ионами Bi. Спектры отражения и спектры КРС подтверждают достаточно высокое кристаллическое качество отожженного GaAs:Bi. Уменьшение сопротивления имплантированных слоев связано с прыжковой проводимостью через радиационные дефекты; после отжига высокое сопротивление слоев восстанавливается. Внедрение атомов Bi вызывает уменьшение запрещенной зоны полупроводника GaAs:Bi.