

МЛЭ рост слоев InAlAs на подложке InP (001) для приборов радиотоники

Д. А. Колосовский, Д. В. Дмитриев, А. И. Торопов, Т. А. Гаврилова, А. С. Кожухов и К. С. Журавлев



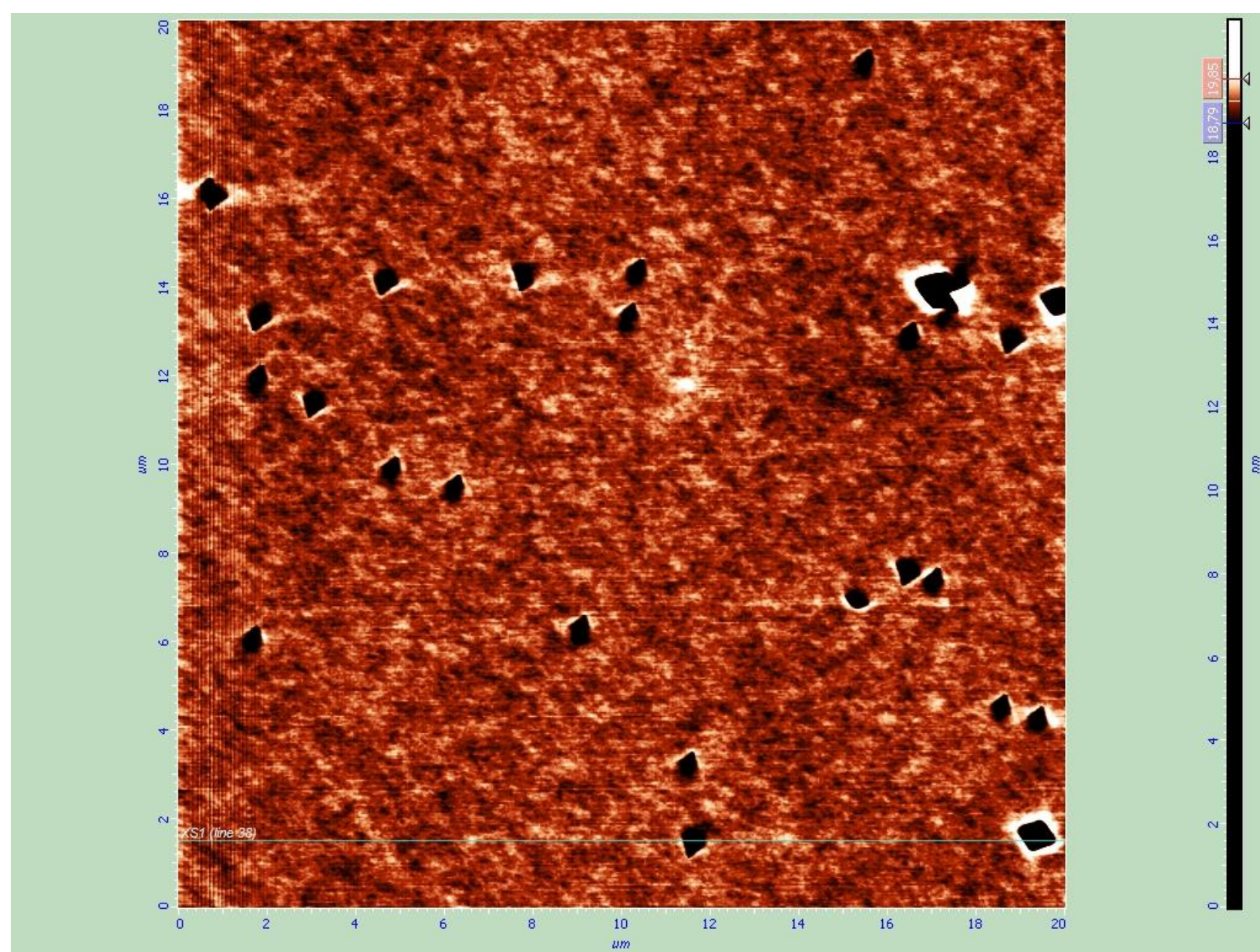
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия
тел: (383)330-69-45, факс: (383)333-27-71,
эл. почта: danil-ak@yandex.ru



Мотивация

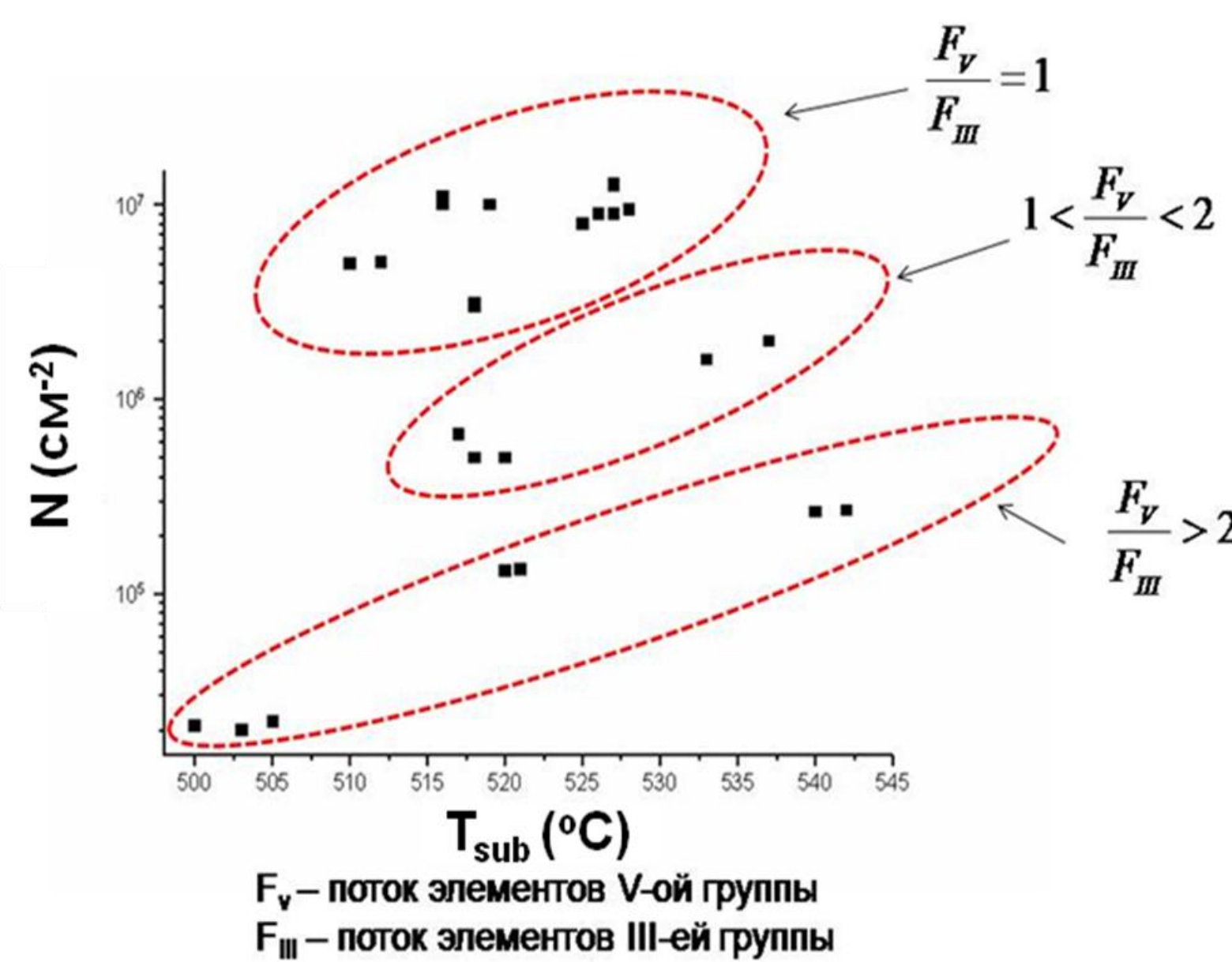
Исследование процесса молекулярно-лучевой эпитаксии решеточно-согласованных с подложкой InP (001) слоев InAlAs является актуальной задачей ввиду широкой применимости таких гетероэпитаксиальных структур в приборах СВЧ электроники, оптоэлектроники и радиотоники. Характеристики приборов зависят от кристаллического совершенства выращенных слоев. Плотность дефектов в слоях InAlAs зависит от условий роста и может достигать 10^9 см^{-2} [1]. В настоящей работе представлена технология роста ГЭС InAlAs/InP, с плотностью дефектов не превышающей 10^3 см^{-2} .

Морфология поверхности и кристаллическая структура слоев InAlAs

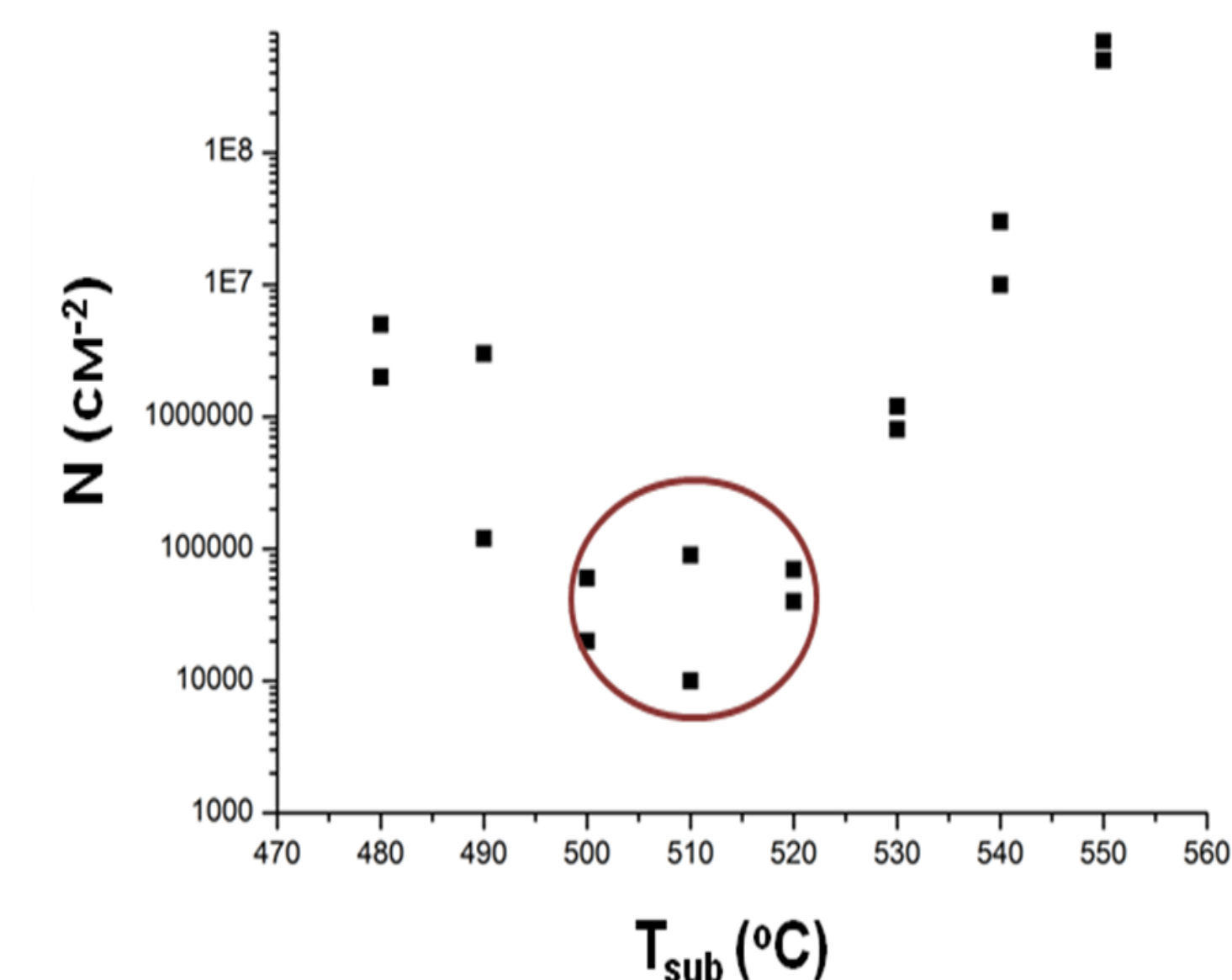


Морфология поверхности слоев InAlAs

$T_{\text{роста}} 520 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{\text{отжига}} 535 \text{ } ^\circ\text{C}$, плотность дефектов $6,25 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$

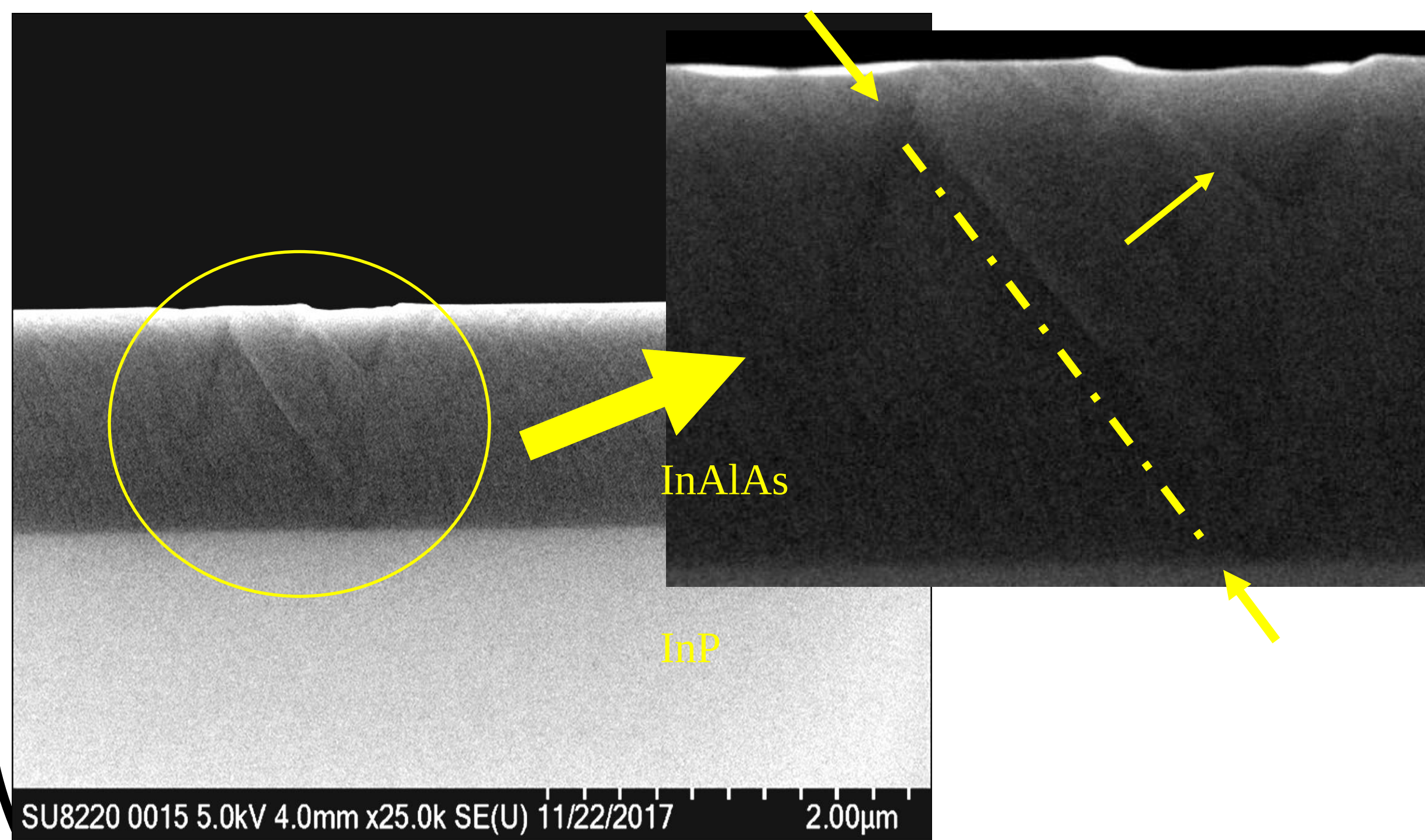


Зависимость плотности дефектов на поверхности слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ от температуры роста и потока мышьяка



Зависимость плотности дефектов на поверхности слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ от температуры отжига подложки InP.

На поверхности выращенных слоев InAlAs наблюдаются дефекты в виде ямок. Средний диаметр ямок зависит от толщины выращенного слоя InAlAs и варьируется от 0,2 до 1 мкм, глубина ямок составляла от 8 до 20 нм. Плотность ямок зависит от температуры роста, потока мышьяка, температуры отжига подложки и варьировалась от 10^4 до 10^9 см^{-2} . Наименьшая плотность дефектов наблюдается при $T_{\text{роста}} 500\text{-}510 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{\text{отжига}} 500\text{-}520 \text{ } ^\circ\text{C}$ и отношении встраиваемого потока мышьяка к встраиваемым потокам элементов третьей группы больше 2.



СЭМ изображение поперечного скола InAlAs/InP.

$T_{\text{роста}} 528 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{\text{отжига}} 522 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Формирование дефектов в виде «ямок»:

На СЭМ изображениях поперечного скола ГЭС наблюдаются дефекты упаковки [2], берущие свое начало на гетерогранице слой/подложка и распространяющиеся по плоскостям {111} до поверхности эпитаксиальной пленки. Причиной образования дефекта упаковки является слой InAs, возникший в процессе высокотемпературного отжига подложки в потоке мышьяка [2]. По данным СЭМ и дифракции быстрых электронов в процессе отжига происходит десорбция атомов фосфора и замещение их атомами мышьяка с образованием слоев InPAs [3] и областей InAs. Постоянная кристаллической решетки InAs составляет $6.0583 \text{ \AA}$, а у $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ и InP $5.8687 \text{ \AA}$. Решеточное рассогласование, возникающее на начальных этапах роста, приводит к растягивающей деформации слоев InAlAs и образованию дислокаций, релаксирующих в виде дефекта упаковки.

Снижение плотности дефектов:

1. Отжиг подложки в диапазоне температур $510\text{-}520 \text{ } ^\circ\text{C}$. Отжиг в этом интервале температур уменьшает содержания As в слоях InPAs [3] и плотность областей InAs на поверхности подложки, при этом данный температурный диапазон позволяет удалить окисел с поверхности подложки.
2. Рост слев InAlAs при температурах $500\text{-}505 \text{ } ^\circ\text{C}$ и использовать соотношение потока встраиваемого мышьяка к потоками встраиваемых элементов третьей группы (In+Al) больше 2.
3. Использовать буферные сверхрешетки InAlAs/InGaAs. Известно, что добавление тонкого буферного слоя помогает снизить плотность дефектов, берущих свое начало на гетерогранице слой/подложка [4]. Включение буферных сверхрешеток позволило снизить плотность дефектов на 1-2 порядка.

[1] P. Gutowski et al., *Materials*, **12**, 1621 (2019).

[2] F. Peiro et al., *Materials Science and Technology*, **13**, 957 (1997).

[3] D.V. Dmitriev et al., *21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, 5 (2020).

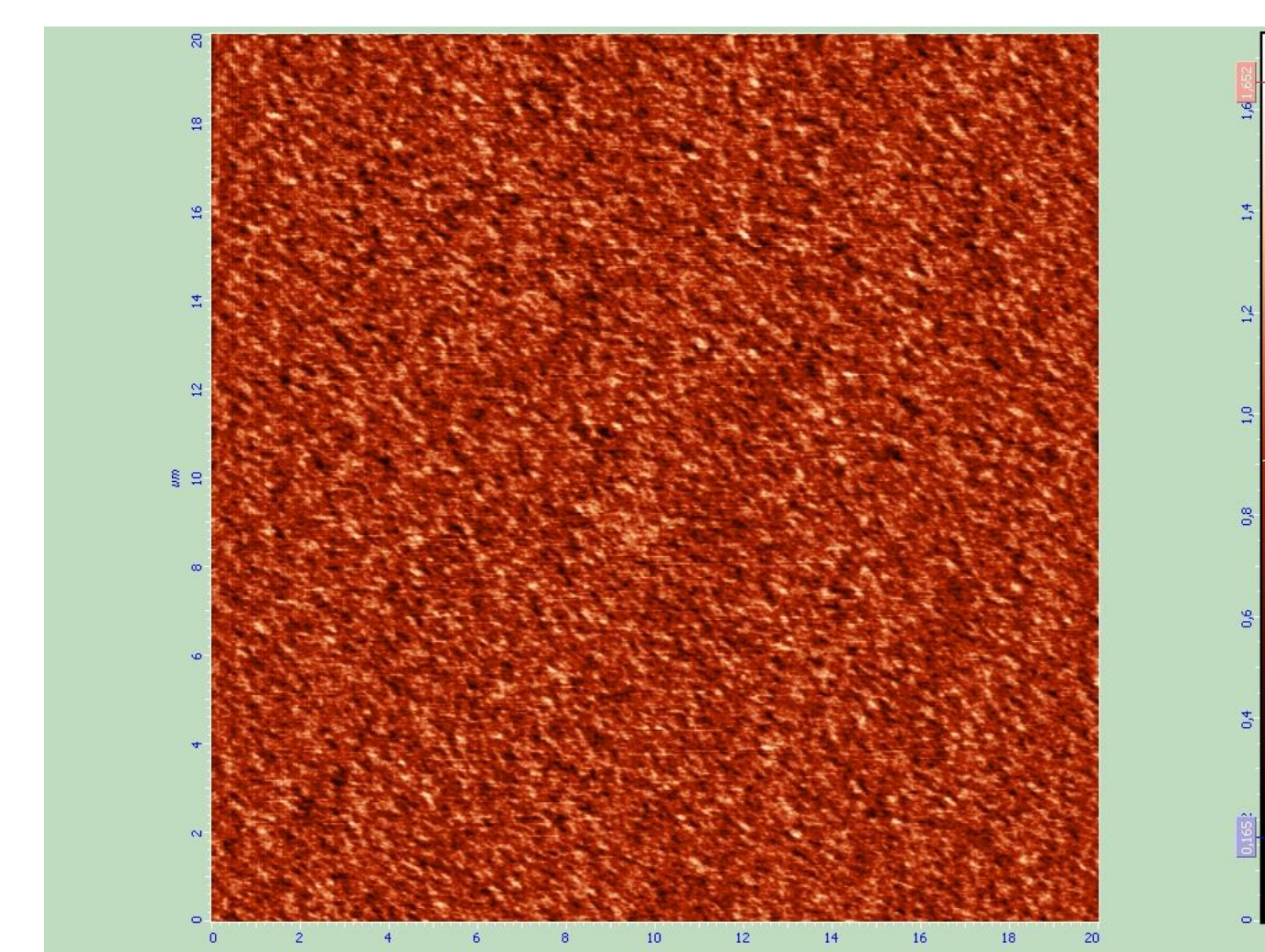
[4] J. Arbiol et al., *Thin Solid Films*, **357**, 61 (1999).

Заключение

Представленная технология роста InAlAs/InP позволяет получить слои с дефектностью менее 10^3 см^{-2} . На АСМ картинах таких слоев наблюдается однородная гладкая поверхность, на которой отсутствуют ямки. Среднеквадратичная шероховатость поверхности не превышает 0.6 нм

На основе разработанной технологии эпитаксиального роста, были получены ГЭС для СВЧ фотодиодов и электро-оптических модуляторов Маха–Цендера.

АСМ и СЭМ исследования проводились на оборудовании ЦКП «Наноструктуры» ИФП СО РАН



АСМ картина поверхности слоя $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, выращенного с буферными слоями при температуре $503 \text{ } ^\circ\text{C}$. Температура отжига $515 \text{ } ^\circ\text{C}$.