

07.3;08.3

Гетероструктуры InGaAlAs/InAlAs для электроабсорбционного модулятора

© Д.В. Гуляев, Д.А. Колосовский, Д.В. Дмитриев, А.К. Гутаковский, Е.А. Колосовский, К.С. Журавлев

Институт физики полупроводников А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: gulyaev@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2022 г.

В окончательной редакции 5 мая 2022 г.

Принято к публикации 17 мая 2022 г.

Исследованы структурные и оптические характеристики гетероструктур с квантовыми ямами InGaAlAs/InAlAs, в которых четверной раствор получен посредством попеременного монослойного роста слоев InAlAs и InGaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Показано, что полученные гетероструктуры перспективны для создания электроабсорбционных модуляторов на длину волны $1.55 \mu\text{m}$ с коэффициентом экстинкции более 20 dB при напряжении менее 4 V.

Ключевые слова: электроабсорбционный модулятор, молекулярно-лучевая эпитаксия, квантовые ямы, эффект Штарка.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52743.19205

Современная тенденция развития систем волоконно-оптической связи и радиофотоники (microwave photonics) заключается в переходе от дискретной компонентной базы к интегральным схемам [1,2], которые могут быть созданы только на основе InP. Электроабсорбционный модулятор (ЭАМ), являющийся одним из ключевых элементов таких схем, должен обеспечивать минимальные оптические потери в отсутствие смещения и сильное поглощение при малом смещении. Для длины волны $1.55 \mu\text{m}$, т.е. минимального ослабления оптического сигнала в оптоволокне, ЭАМ может быть выполнен на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) с квантовыми ямами (КЯ) InGaAlAs/InAlAs [3–5] или InGaAsP/InP [5–7]. При этом ГЭС на основе InGaAlAs/InAlAs предпочтительнее, поскольку они обеспечивают большую локализацию экситонов в КЯ из-за большего разрыва зон и, следовательно, большую температурную стабильность и уменьшение эффектов насыщения [5,8]. Использование в качестве материала КЯ четверного соединения InGaAlAs позволяет за счет увеличения запрещенной зоны с ростом доли Al сдвинуть спектр поглощения КЯ в коротковолновую часть спектра от рабочей длины волны ЭАМ ($1.55 \mu\text{m}$) и понизить потери на поглощение света при отсутствии смещения. Использование с этой целью только эффекта размерного квантования в КЯ InGaAs малоприменимо, поскольку уменьшение ширины КЯ, необходимое для сдвига спектра поглощения, сопровождается падением величины квантово-размерного эффекта Штарка [9]. В то же время в твердых растворах четверного состава может происходить спинодальный распад [10], отсутствующий в тройных соединениях InGaAs и InAlAs [11,12]. Перспективным способом избежать такого распада соединений InGaAlAs является цифровая эпитаксия [13], которая осуществляется путем попеременного субмонослойного

или монослойного роста тройных компонентов (InGaAs и InAlAs) четверного твердого раствора (InGaAlAs). При этом состав четверного раствора задается временем роста (толщиной) субслоев InGaAs и InAlAs. К преимуществам такого метода можно отнести возможность выращивания структур различных составов при использовании в установке молекулярно-лучевой эпитаксии одного набора источников исходных материалов (In, Ga, Al и As). Рост тройных компонентов InGaAs и InAlAs выполняется за счет попеременного открытия/закрытия источников Ga/Al. Такой метод не требует изменения температуры источников, что обеспечивает хорошую воспроизводимость и стабильность задаваемых составов, т.е. соотношений In/Ga и In/Al. В то же время оптические и энергетические свойства однородного и цифрового четверного раствора InGaAlAs могут различаться. В настоящей работе исследованы структурные и оптические свойства ГЭС с КЯ InGaAlAs/InAlAs, полученными методом цифровой эпитаксии, и показана их перспективность для создания ЭАМ на длину волны $1.55 \mu\text{m}$.

Гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на нелегированной подложке InP (001) на установке Riber Compact-21T. В ГЭС варьировался элементный состав КЯ InGaAlAs. Для прецизионного изменения состава КЯ и, следовательно, ширины запрещенной зоны менялось отношение толщин слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (два монослоя во всех исследованных образцах) и $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (шесть или восемь монослоев в разных образцах). Исследованные ГЭС представляли собой $p-i-n$ -структуры, содержащие следующие слои: 1) p^+ -слой InGaAs толщиной 100 nm с уровнем легирования $1.5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$, предназначенный для защиты поверхности от окисления; 2) верхний (p^+ -InAlAs) и нижний (n^+ -InAlAs) контактные слои

толщиной 200 nm с уровнем легирования $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 3) дополнительные *n*- и *p*-слои InAlAs толщиной 200 nm с уровнем легирования $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, обеспечивающие линейное падение напряжения в нелегированной области ГЭС; 4) центральная активная область ГЭС толщиной 300 nm, состоящая из множественных квантовых ям (МКЯ) — 12 периодов МКЯ InGaAlAs/InAlAs толщиной 14/10 nm или 11 периодов МКЯ толщиной 17/10 nm. Рост барьерных слоев InAlAs осуществлялся при оптимальной для роста Al-содержащих слоев температуре 510–520°C, рост КЯ InGaAlAs — при температуре 480–490°C. Температурный переход осуществлялся на начальном и финальном этапах выращивания барьерного слоя InAlAs, соответствующих приблизительно 2 nm. В качестве акцепторной примеси использовался Be, в качестве донорной примеси — Si. Для исследования электрооптических характеристик на основе *p-i-n*-структуры были изготовлены тестовые образцы с омическими контактами. Для формирования нижнего контакта к *n*⁺-InAlAs использовалась композиция Ge/Au/Ni/Au толщиной 20/40/20/200 nm, для формирования верхнего контакта к *p*⁺-InGaAs — композиция Ti/Au толщиной 20/200 nm. Боковая поверхность мезы закрывалась слоем SiO₂ толщиной 100 nm.

На рис. 1 приведено типичное изображение активной области ГЭС, состоящей из МКЯ, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режиме поперечного сечения (микроскоп ТИТАН 80-300 с латеральным разрешением 0.79 Å). Как можно видеть из рисунка, гетерограницы слоев тройных растворов, используемых для формирования КЯ InGaAlAs, достаточно резкие. Перемешивания тройных растворов InGaAs и InAlAs до однородного четверного раствора InGaAlAs не наблюдается даже при использовании слоев InAlAs толщиной в два монослоя, т.е. выращенная КЯ InGaAlAs сама представляет собой короткопериодную сверхрешетку (см. вставку на рис. 1).

Как следует из спектров фотолюминесценции (ФЛ) ГЭС, представленных на рис. 2, *a*, запрещенная зона МКЯ с отношением монослоев InAlAs/InGaAs, равным 2/6, отстоит от рабочей длины волны ЭАМ на 0.21 μm, а МКЯ с отношением 2/8 — на 0.15 μm. Ширина на полувысоте (FWHM) полосы ФЛ от МКЯ при азотной температуре, при которой FWHM определяется в основном флуктуациями состава и толщины ямы, а не температурным уширением, составляет 12–18 meV. Измеренная ширина полосы ФЛ типична для МКЯ InGaAlAs/InAlAs [14,15] и соответствует флуктуациям состава в 1–2%.

Для определения пассивных оптических потерь в МКЯ, т.е. в отсутствие смещения, на фурье-спектрометре Bruker vertex 80v были проведены измерения спектров отражения $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$ ГЭС, состоящих только из МКЯ. Коэффициент поглощения определялся как $\alpha(\lambda) = -\ln(1 - T(\lambda) - R(\lambda))/W$ (где W — суммарная ширина МКЯ), а пассивные оптические потери — как $10 \lg(\exp(-\alpha(\lambda)L)) = -10 \lg e \alpha(\lambda)L$. Как

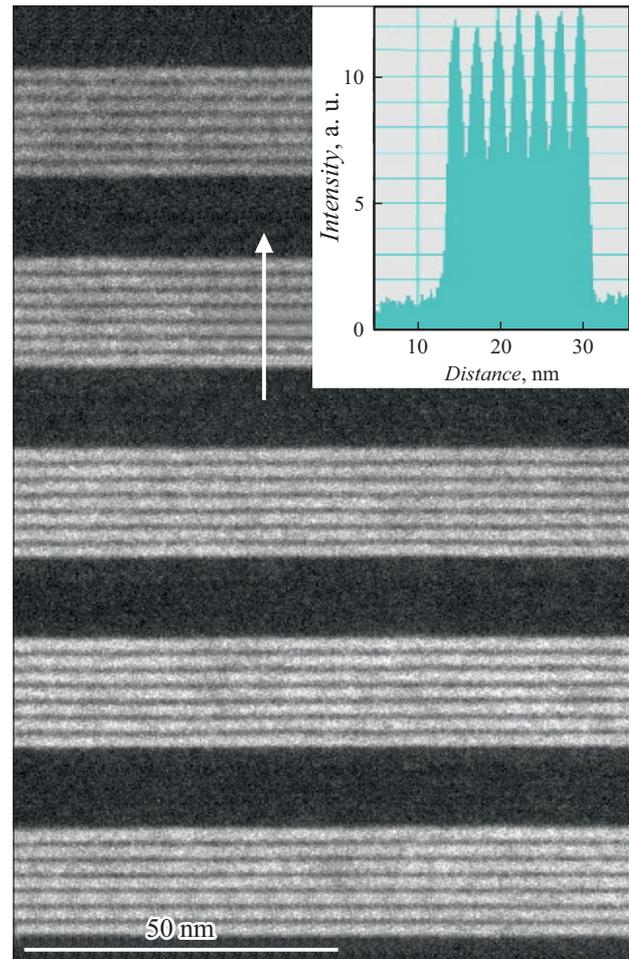


Рис. 1. ПЭМ-изображение типичной цифровой КЯ InGaAlAs/InAlAs. На вставке — профиль распределения интенсивности ПЭМ-изображения, соответствующий стрелке.

видно из рис. 2, *b*, пассивные потери в исследованных МКЯ не превышают 1 dB/mm при 1.55 μm.

Мы провели расчет и сравнили энергетическую структуру и волновые функции носителей заряда для однородной и цифровой КЯ InGaAlAs. Для расчета использовалась тестовая версия программы nextrano [16], самосогласованно решающая уравнения Пуассона и Шредингера. Из рис. 3, *a*, *b* видно, что волновые функции носителей заряда для однородной и цифровой КЯ различаются слабо, поскольку два монослоя InAlAs не являются достаточным препятствием для носителей заряда.

Зависимость коэффициента экстинкции исследованных ГЭС от напряжения представлена на рис. 3, *c*. На вставке к этому рисунку изображена геометрия эксперимента, в котором измерялось пропускание света поперек ГЭС на длине волны 1.55 μm, что соответствует TE-моду световой волны. В ЭАМ световая волна распространяется вдоль ГЭС, т.е. его действие может быть основано как на TE-, так и на TM-моду световой волны. Коэффициенты экстинкции TE- и TM-мод световой волны различаются, однако в первом приближении эти

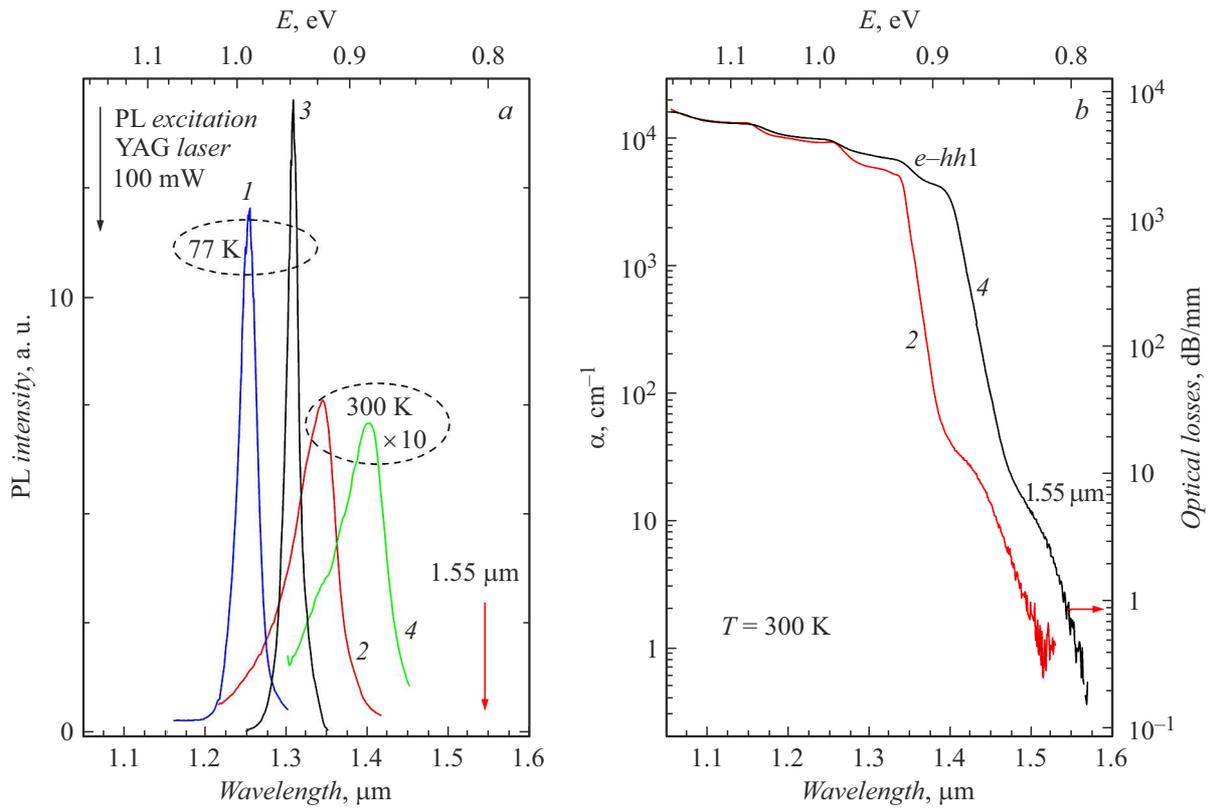


Рис. 2. Спектры ФЛ (а) и спектральная зависимость оптических потерь (б) цифровых МКЯ InGaAlAs с отношением монослоев InAlAs/InGaAs, равным 2/6 (1, 2) и 2/8 (3, 4).

коэффициенты можно считать равными [8]. Коэффициент экстинкции ГЭС связан с изменением коэффициента поглощения $\Delta\alpha(V)$ следующим соотношением:

$$T(V) = 10 \lg \left(\frac{I(V)}{I(0)} \right) \approx 10 \lg (\exp(-\Delta\alpha(V)L)),$$

где $I(0)$ и $I(V)$ — интенсивности прошедшего сквозь ГЭС света при отсутствии/наличии электрического поля, V — прикладываемое напряжение, L — длина ЭАМ. Поскольку

$$\begin{aligned} \Delta I(V) &= \frac{I(0) - I(V)}{I(0)} \\ &\approx \frac{I_0 [\exp(-\alpha W) - \exp(-(\alpha + \Delta\alpha(V))W)]}{I_0 \exp(-\alpha W)} \\ &= 1 - \exp(-\Delta\alpha(V)W), \end{aligned}$$

имеем

$$\Delta\alpha(V) = -\ln(1 - \Delta I(V))/W \approx \Delta I(V)/W$$

(при $\Delta I(V) \rightarrow 0$). Тогда коэффициент экстинкции

$$T(V) = 10 \lg (\exp(-\Delta I(V)L/W)) = -10 \lg e \Delta I(V)L/W.$$

Как можно видеть из рис. 3, с, для МКЯ с отношением монослоев InAlAs/InGaAs, равным 2/8, коэффициент

экстинкции превышает по абсолютной величине -20 dB при напряжении 4 V и длине 1 mm. Полученное значение коэффициента сопоставимо с литературными данными по ЭАМ: типичное напряжение смещения ЭАМ на фосфид-индиевой платформе составляет 1.5-4 V [3-7], а длина в 1 mm при малых пассивных оптических потерях (рис. 2, б) обеспечивает технологическую простоту монтажа чипа и стыковки с оптоволокном [7]. Поэтому данная ГЭС хорошо подходит для создания ЭАМ. Следует отметить, что рабочее напряжение смещения можно уменьшить за счет уменьшения отношения монослоев InAlAs/InGaAs в составе КЯ и сопутствующего приближения края поглощения МКЯ к рабочей длине волны, однако этот эффект будет сопровождаться возрастанием пассивных оптических потерь. Для МКЯ с отношением монослоев InAlAs/InGaAs, равным 2/6, коэффициент экстинкции не превышает -3 dB при напряжении 4 V и длине 1 mm (рис. 3, с), т.е. данная ГЭС может быть перспективна для изготовления электрооптических модуляторов на основе интерферометра Маха-Цендера, требующих малых оптических потерь при распространении света.

Таким образом, в работе продемонстрированы структурные и электрооптические свойства гетероструктур с квантовыми ямами InGaAlAs/InAlAs, в которых четверной раствор получен посредством попеременного монослойного роста InAlAs и InGaAs. Показано, что

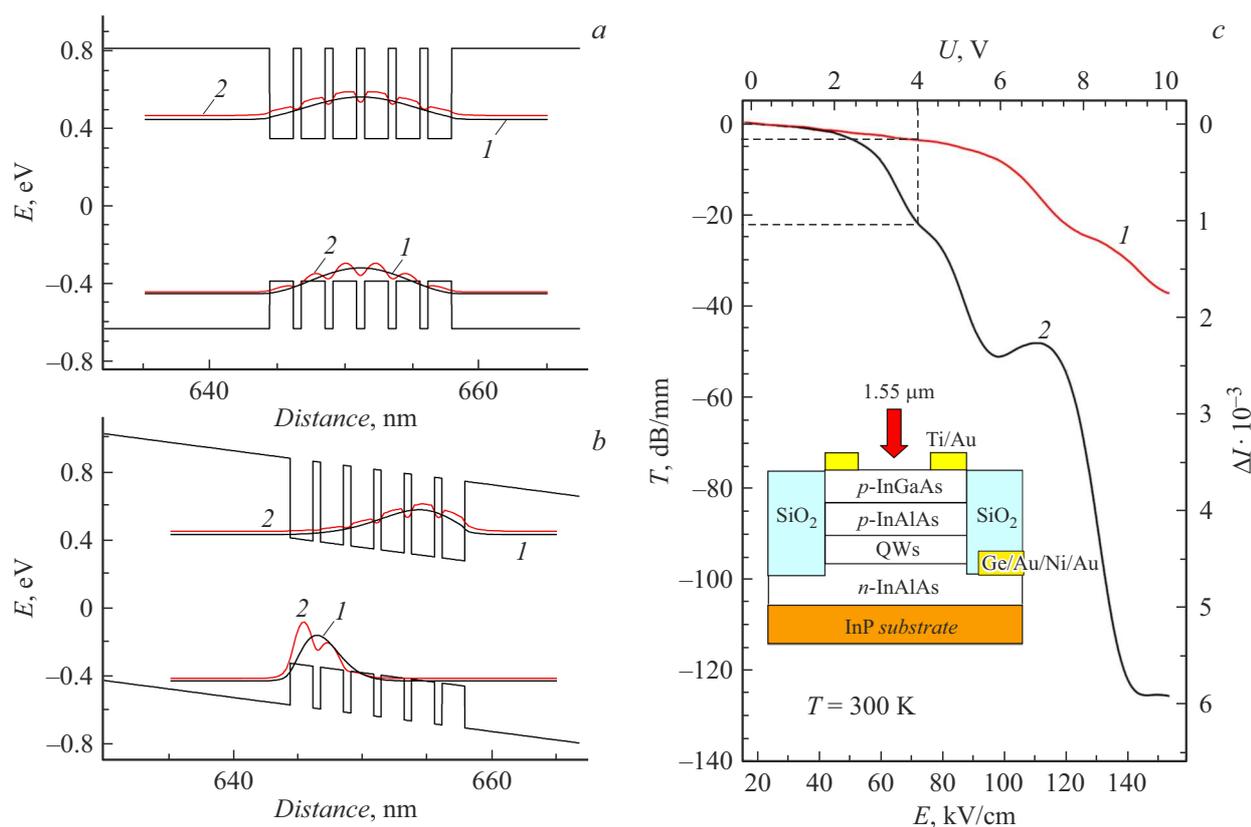


Рис. 3. Распределение волновых функций электронов и дырок без (а) и в электрическом поле напряженностью 100 кВ/см (b) для однородной МКЯ InGaAlAs/InAlAs (1) и цифровой КЯ (2). с — зависимость коэффициента экстинкции от прикладываемого напряжения в цифровых МКЯ InGaAlAs с отношением монослоев InAlAs/InGaAs, равным 2/6 (1) и 2/8 (2). На вставке изображена геометрия эксперимента. В качестве источника света с длиной волны 1.55 μm использовался полупроводниковый лазер с шириной линии 200 кГц.

такой метод перспективен для создания электроабсорбционных модуляторов на длину волны 1.55 μm .

Благодарности

ПЭМ-исследования выполнялись в ЦКБ „Наноструктуры“ ИФП СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Nagarajan, M. Kato, J. Pleumeekers, P. Evans, S. Corzine, S. Hurtt, A. Dentai, S. Murthy, M. Missey, R. Muthiah, R.A. Salvatore, C. Joyner, R. Schneider, M. Ziari, F. Kish, D. Welch, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **16** (5), 1113 (2010). DOI: 10.1109/JSTQE.2009.2037828
- [2] L.M. Augustin, R. Santos, E. den Haan, S. Kleijn, P.J.A. Thijs, S. Latkowski, D. Zhao, W. Yao, J. Bolk, H. Ambrosius, S. Mingaleev, A. Richter, A. Bakker, T. Korthorst, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **24** (1), 6100210 (2018). DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2720967
- [3] W. Kobayashi, T. Yamanaka, M. Arai, IEEE Photon. Technol. Lett., **21** (18), 1317 (2009). DOI: 10.1109/lpt.2009.2026485
- [4] H. Fukano, T. Yamanaka, M. Tamura, J. Lightwave Technol., **25** (8), 1961 (2007). DOI: 10.1109/JLT.2007.901328
- [5] K. Kim, D.-S. Shin, J. Opt. Soc. Korea, **11** (3), 133 (2007). DOI: 10.3807/JOSK.2007.11.3.133
- [6] W.-J. Choi, A.E. Bond, J. Kim, J. Zhang, R. Jambunathan, H. Foulk, S. O'Brien, J. Van Norman, D. Vandegriff, C. Wanamaker, J. Shakespeare, H. Cao, J. Lightwave Technol., **20** (12), 2052 (2002). DOI: 10.1109/JLT.2002.806756
- [7] D. Pasquariello, E.S. Bjorlin, D. Lasoosa, Y.-J. Chiu, J. Piprek, J.E. Bowers, J. Lightwave Technol., **24** (3), 1470 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2005.863227
- [8] *Broadband optical modulators: science, technology, and applications*, ed. by A. Chen, E.J. Murphy (CRC Press, 2012).
- [9] D.A.B. Miller, D.S. Chemla, S. Schmitt-Rink, Phys. Rev. B, **33** (10), 6976 (1986). DOI: 10.1103/PhysRevB.33.6976
- [10] W.-P. Hong, A. Chin, N. Debbar, J. Hinckley, P.K. Bhattacharya, J. Singh, J. Vac. Sci. Technol. B, **5** (3), 800 (1987). DOI: 10.1063/1.100228
- [11] J. Singh, S. Dudley, B. Davies, K.K. Bajaj, J. Appl. Phys., **60** (9), 3167 (1986). DOI: 10.1063/1.337730
- [12] F. Peiró, A. Cornet, J.R. Morante, S.A. Clark, R.H. Williams, J. Appl. Phys., **71** (5), 2470 (1992). DOI: 10.1063/1.351083

- [13] T. Fujii, Y. Nakata, Y. Sugiyama, S. Hiyamizu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25** (3A), L254 (1986). DOI: 10.1143/JJAP.25.L254
- [14] I. Novikov, A. Nadtochiy, A. Potapov, A. Gladyshev, E. Kolodeznyi, S. Rochas, A. Babichev, V. Andryushkin, D. Denisov, L. Karachinsky, A. Egorov, V. Bougrov, *J. Lumin.*, **239**, 118393 (2021). DOI: 10.1016/J.JLUMIN.2021.118393
- [15] C.L. Chiu, E.Y. Lin, K.Y. Chuang, D.J.Y. Feng, T.S. Lay, *Physica B*, **404** (8-11), 1226 (2009). DOI: 10.1016/j.physb.2008.11.225
- [16] <https://www.nextnano.de>