Люминесцентные центры в кремнии, облученном фемтосекундным лазером

© А.Е. Калядин,¹ Д.С. Поляков,² В.П. Вейко,² Н.А. Соболев¹¶

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия ²Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия [¶] e-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 6 ноября 2024 г. В окончательной редакции 10 февраля 2025 г. Принято к публикации 20 февраля 2025 г.

> Исследована фотолюминесценция в кремнии, выращенном методом Чохральского и облученном фемтосекундным титан-сапфировым лазером с длиной волны 780 nm. В спектрах наблюдалось образование широкой полосы в области 1.15–1.6 µm, узких W-, H- и P-линий, а также линии краевой люминесценции. Исследовано влияние температуры измерения люминесценции, длины волны и мощности возбуждающего лазера на эти спектры. Определены энергии активации температурного гашения интенсивности люминесценции и эффективности возбуждения W-, H- и P-линий. С увеличением мощности накачки интегральная интенсивность широкой полосы возрастает, а интегральная интенсивность линии краевой люминесценции уменьшается.

> Ключевые слова: кремний, фемтосскундный лазер, точечные дефекты, энергия активации температурного гашения люминесценции, эффективность возбуждения люминесценции.

DOI: 10.61011/JTF.2025.06.60466.408-24

Введение

07

Люминесценция является эффективным методом исследования природы и свойств дефектов, образующихся при радиационном облучении и последующем температурном отжиге [1,2]. Эти дефекты формировались из комплексов или кластеров точечных дефектов, образующихся из собственных междоузельных атомов кремния, вакансий и примесных атомов (О, С, элементов III и V групп таблицы Д.И. Менделеева). Интенсивность люминесценции этих центров с повышением температуры сильно (на несколько порядков) уменьшалась и поэтому не вызывала интереса для практического применения. Однако в последнее время низкотемпературные кремниевые светодиоды нашли применение во множестве областей, таких как квантовая оптика, расчеты при сверхнизких температурах и нейроморфные вычисления [3,4]. Светодиоды с X- (длина волны 1193 nm), W-(1214 nm), G- (1280 nm), H- (1339 nm), C- (1571 nm), Т- (1326 nm) и Р- (1617 nm) центрами рассматриваются как наиболее перспективные, поскольку они характеризуются узкими и хорошо воспроизводимыми линиями оптической эмиссии и поглощения [5-7]. Структура не всех вышеупомянутых центров установлена достаточно надежно, а оптические свойства также подлежат более глубокому изучению. Следует отметить, что исследование вышеуказанных центров в обогащенном изотопом ³⁰Si позволяет выявить их новые свойства. Так, в [8] получены новые данные по ширине и тонкой структуре W-, С- и G-линий. За прошедшие 50 лет было разработано множество технологических методов для введения

этих центров в кремний [2]. Наибольшее распространение получил метод ионной имплантации, поскольку он используется в производстве интегральных схем. Однако разработка новых технологических методов для создания светоизлучающих структур продолжается. В частности, в [9] было продемонстрировано введение G- и W-центров с помощью имплантации сфокусированным (диаметр 50 nm) ионным пучком с нанометровой точностью. Комбинация методов металл-стимулированного химического травления (metal-assisted chemical etching, MACEtch) и имплантация ионов углерода позволила сформировать систему столбиков (nanopillars) в количестве тысяча штук на квадратный миллиметр с люминесценцией G-центра [10]. Исследование возможности формирования люминесцентных центров с помощью лазерного облучения представляет интерес, поскольку в большинстве случаев исключается необходимость дополнительного отжига, который необходим после радиационного воздействия или ионной имплантации.

В настоящее время воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на монокристаллический кремний широко используется для создания на его поверхности различного рода функциональных микро- и нанорельефов [11–13]. В частности, путем фемтосекундного лазерного макроструктурирования возможно создание антиотражающих рельефов на поверхности кремния для повышения эффективности работы солнечных батарей и фотодетекторов [14–16], для управления гидрофобными/гидрофильными свойствами поверхности [17,18], для управления адгезией клеток [19]. Другим потенциально перспективным применением лазерной обработки кремния является возможность формирования оптически активных центров в приповерхностной области. В работе [20] было показано, что обработка поверхности монокристаллического кремния серией фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере SF_6 с последующим термическим отжигом приводит к появлению в спектре люминесценции при низких температурах широкой полосы с максимумом на длине волны 1540 nm, которую авторы интерпретировали как D1-линию дислокационной (dislocation-related) люминесценции.

Образование структурных дефектов и люминесцентных центров в кремнии, облученном фемтосекундным лазером, происходит в результате интенсивного термомеханического воздействия на поверхностные слои материала [21,22]. Поглощение лазерного импульса на длине волны 780 nm происходит за счет однофотонных и двухфотонных межзонных переходов, что приводит к генерации плотной электрон-дырочной плазмы с концентрацией носителей $\sim 10^{21}\,{\rm cm}^{-3}$. Интенсивное фотовозбуждение полупроводника приводит к росту поглощения свободными носителями заряда и их нагреву до температур $\sim 10^4$ K, при этом вследствие кратковременности воздействия решетка остается практически холодной на фемтосекундном временном масштабе. После окончания действия импульса на пикосекундном временном масштабе горячие носители передают энергию в решетку, что приводит к росту ее температуры. Из-за нелинейного характера поглощения глубина зоны лазерного воздействия существенно ниже, чем глубина проникновения излучения в линейном режиме поглощения, которая для длины волны 780 nm составляет 8 µm [23]. Важно, что нагрев решетки происходит на пикосекундном временном масштабе практически изохорически (материал не успевает расширяться), что приводит к сильному росту давления в поверхностных слоях. Свидетельством генерации давления с величинами порядка нескольких GPa и выше при фемтосекундном лазерном воздействии является факт обнаружения полиморфных модификаций кремния (фаз высокого давления) в облученных областях [24]. Возможность использования лазерной обработки импульсами фемтосекундной длительности для создания Х-, W-, H-, C-, G-, Т- и Р-центров не изучалась. Цель настоящей работы заключается в исследовании люминесцентных центров, образующихся в кремнии при лазерном облучении, а также влияния температуры измерения и мощности возбуждения на параметры этих центров.

1. Методика эксперимента

Исходный образец представлял собой пластину монокристаллического Si *p*-типа проводимости, выращенного методом Чохральского (Cz−Si) в направлении [100], с удельным сопротивлением 20 Ω·ст (КДБ-20). Для облучения использовался фемтосекундный (fs) титансапфировый лазер с длиной волны 780 nm, длительностью импульса 100 fs и частотой следования импульсов 10 Hz. Лазерный луч имел гауссов профиль интенсивности и фокусировался в пятно с диаметром 150 μ m по уровню e⁻¹. Облучение пластины осуществлялось на воздухе при нормальных условиях путем построчного сканирования области с размерами 3 × 3 mm² со скоростью ~ 100 μ m/s (расстояние между линиями сканирования ~ 100 μ m). Энергия в импульсе составляла ~ 160–190 μ J. Соответствующая плотность энергии в центре пучка составила ~ 0.95 J/cm². Люминесцентные центры формировались в тонком приповерхностном слое, поскольку при большой мощности излучения коэффициент поглощения в Si для длины волны лазера возрастает на несколько порядков [11].

Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась красным (длина волны 632 nm), зеленым (532 nm) и фиолетовым (405 nm) светом от непрерывных твердотельных и полупроводникового лазеров с мощностью до 2-50 mW и регистрировалась в области длин волн 1000-1650 nm при температурах 10-100 K с помощью автоматизированного монохроматора МДР-23 и InGaAs-фотоприемника, работающего при комнатной температуре. Коррекция на оптический тракт и чувствительность детектора проводилась с помощью калибровочной лампы Avalight-hal-cal с известным спектральным распределением. Разрешение установки составляло 5 nm.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Характерные спектры ФЛ образцов после лазерного облучения, измеренные при температурах 10-40 К, приведены на рис. 1. В области 1050-1200 nm регистрируются линии люминесценции, обусловленные легирующей примесью бора в исходном образце, и высокоинтенсивная линия собственной люминесценции



Рис. 1. Спектры ФЛ образцов после лазерного облучения при температурах, К: *I* — 10, *2* — 20, *3* — 30 и *4* — 40. Мощность зеленого лазера составляла 31 mW.

(1130 nm) [25], так называемая краевая (near-band-edge, NBE). В диапазоне 1200-1650 nm наблюдается образование узких линий с максимумами на длинах волн 1213, 1340 и 1618 nm и широкой дефектной полосы (defect-related band). По мере увеличения длин волн ее интенсивность снижается. Появление этой дефектной полосы наблюдалось ранее после облучения кремния быстрыми частицами [26] и ионной имплантации [2]. Однако ее природа до сих пор не установлена [10]. Узкие линии принадлежат известным W-, Н- и Р-центрам соответственно. W-линия принадлежит центру, сформированному из трех междоузельных атомов кремния (triinterstitials) [27-29]. Н- и Р-линии принадлежат комплексам, в состав которых входят атомы кислорода. Они возникают при облучении и имплантации, а также после термообработок Cz-Si с высокой концентрацией кислорода при температурах 250 °C-600 °C и длительности 1-500 h [2,30,31]. NBE-линия, как правило, после радиационного облучения или ионной имплантации не наблюдается, но может появиться в результате последующего отжига.

Температурные зависимости интенсивностей ФЛ Ни Р-линий в диапазоне температур 20–70 К приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, с ростом температуры их интенсивности уменьшаются. Они хорошо описываются известной формулой [2]:

$$I(T) = I(0)[1 + A\exp(-E/kT)]^{-1},$$
(1)

где E — энергия активации гашения люминесценции, A — константа связи для данного центра. Энергии активации гашения интенсивностей ФЛ равны $E_{\rm H} = 34.9$ meVu $E_{\rm P} = 12.8$ meV. Как правило, гашение обусловлено многофононной безызлучательной рекомбинацией.

В [30] для образца, полученного имплантацией ионов эрбия и кислорода, энергия гашения Н-центра равнялась 19 meV. Наблюдавшееся почти двукратное различие, по-видимому, обусловлено разной дефектной системой

10

PL intensity, a. u.

0.1

10

20



30

 $1000/T, K^{-1}$

40

50

2



Рис. 3. Спектры ФЛ образцов после лазерного облучения при мощности возбуждения зеленого лазера, mW: 1 - 6, 2 - 9, 3 - 19 и 4 - 35, измеренные при температуре 10 К в диапазонах длин волн, nm: a - 1000 - 1650, b - 1100 - 1350, c - 1600 - 1650 (c - масштаб по оси интенсивности люминесценции уменьшен в 5 раз).

структурных дефектов, которые могут несколько изменять структуру люминесцентного Н-центра, и системы центров безызлучательной люминесценции. Полученная в настоящей работе энергия активации гашения ФЛ для Р-центра очень близка к значениям энергии гашения, определенных в [2] (14.7 meV), и [30] (11 meV).

На рис. 3, *а* приведены спектры Φ Л, измеренные при 10 К и разных мощностях возбуждающего света (плотности потока фотонов, *F*) с длиной волны 532 nm. Для W-, H- и Р-линий увеличение мощности накачки не приводит к изменению их положения, но увеличивает интенсивность Φ Л. В отличие от этих центров увеличение мощности накачки приводит к уменьшению интенсивности NBE-линии (ср. рис. 3, *b* и *c*).

Зависимости интенсивностей линий точечных дефектов от плотности потока фотонов приведены на рис. 4. Эти зависимости описываются хорошо известной формулой [32]:

$$PL(F) = PL_{\max}\sigma\tau F / (\sigma\tau F + 1), \qquad (2)$$

где PL_{\max} — максимальная интенсивность ФЛ, σ — сечение захвата фотонов на центр и τ — время



Рис. 4. Зависимости интенсивностей ФЛ для: *1* — Р-, *2* — W-, *3* — Н-линий от плотности потока фотонов при температуре 10 К.

жизни центра в возбужденном состоянии. Чем выше эффективность возбуждения, тем при меньшей мощности накачки достигается насыщение интенсивности люминесценции. Аппроксимация экспериментальных зависимостей вышеуказанной формулой дает значения для H-центра (1240 nm) ($\sigma \tau$)_H = 4.8 · 10⁻¹⁹ cm²·s, для P-центра (1678 nm) ($\sigma \tau$)_P = 10 · 10⁻¹⁹ cm²·s, и для W-центра (1214 nm) ($\sigma \tau$)_W = 1 · 10⁻¹⁹ cm²·s. Насколько нам известно, эффективность возбуждения люминесцентных W-, H- и P-центров ранее не исследовалась.

Увеличение мощности накачки приводит к увеличению интенсивности $\Phi \Pi$ дефектной полосы (рис. 3, *a*). При этом форма спектра не изменяется. Это означает, что структура люминесцентных центров в этой полосе не изменяется, но увеличивается концентрация возбуждаемых центров. Зависимость интегральной интенсивности дефектной полосы от мощности накачки приведена на рис. 5. Важно отметить, что эта интегральная зависимость также имеет тенденцию к насыщению, как и исследованные выше центры точечных дефектов.

Увеличение мощности накачки сопровождается уменьшением интегральной интенсивности линии краевой $\Phi \Pi$ (рис. 3, *b*). Это противоречит имеющимся экспериментальным данным для образцов, в которых светоизлучающий слой создавался в процессах отжига кремния, имплантированного ионами Er [30,33], Si [34,35], О [36,37], Р [34], жидкофазной перекристаллизации аморфизованного слоя, образовавшегося при лазерном облучении [38], и сращивания кремниевых пластин (так называемого bonding процесса) [34]. При этом люминесцентные центры ионов Er³⁺ [30,33], {113} дефектов [36] и дислокационной люминесценции [30,34-37] находились в приповерхностном слое, который формировался в процессе термического отжига нарушенного слоя. Часто после отжига в спектрах люминесценции появлялась и линия краевой люминесценции. Было показано, что эта линия возникает глубже нарушенного слоя. Как правило, с увеличением интенсивности возбуждающего света или тока накачки ее интенсивность возрастает и даже может превышать интенсивность сформированных люминесцентных центров по мере роста концентрации возбужденных центров [30]. Разумно предположить, что и в нашем эксперименте центры, ответственные за ФЛ W-, H-, P-линий и дефектной полосы, образовались в модифицированном при лазерном облучении приповерхностном слое, а краевая люминесценция (NBE-центр) возбуждается в области, расположенной за дефектным слоем. Чтобы проверить наше предположение, спектры фотолюминесценции измерялись при ее возбуждении разными лазерами (рис. 6).

В случае фиолетового лазера краевая люминесценция практически отсутствует, отношение интегральной интенсивности NBE-линии к интегральной интенсивности дефектной люминесценции (*R*) стремится к нулю, поскольку практически весь свет от лазера поглощается



Рис. 5. Зависимость интегральной интенсивности ФЛ от мощности возбуждения зеленого лазера для дефектной полосы (1) и NBE-линии (2). Температура измерения 10 К.



Рис. 6. Спектры ФЛ при ее возбуждении разными лазерами при температуре 10 К. Длина волны возбуждающего света λ , nm (мощность лазера, mW): I - 532 (35), 2 - 405 (46) и 3 - 632 (30).

в дефектном слое. Глубина проникновения зеленого света в кремнии больше, чем фиолетового, и он проникает уже в ненарушенный лазерным облучением слой, вызывая появление краевой люминесценции и увеличивая *R*. Красный свет проникает еще глубже, и доля проникающего излучения (вызывающего NBE ФЛ) составляет большую часть от всего излучения по сравнению с зеленым светом, и, соответственно, увеличивается *R*. В упомянутых экспериментах, как правило, интенсивность краевой люминесценции прямо пропорциональна интенсивности возбуждения. Это свидетельствует о том, что степень нарушения дефектной структуры не вызывает изменения коэффициента поглощения возбуждающего света при увеличении его интенсивности. Как указывалось выше, при облучении кремния фемтосекундным лазером могут возникать более существенные нарушения дефектной структуры. В частности, коэффициент поглощения света может нарастать по мере приближения к поверхности. В результате при увеличении интенсивности возбуждающего света эффективность его поглощения в нарушенном слое возрастает и большая его часть идет на возбуждение W-, H-, Р-линий и широкой полосы, а уменьшение доли прошедшего света, который и возбуждает краевую люминесценцию, сопровождается уменьшением ее интенсивности (рис. 5).

Заключение

Изучена ФЛ в кремнии, выращенном методом Чохральского и облученного фемтосекундным титансапфировым лазером с длиной волны 780 nm. В спектрах ФЛ облученных образцов образуются широкая полоса в области 1.15-1.6 µm, узкие W-, Н- и Р-линии, а также линия краевой люминесценции. Исследовано влияние температуры измерения, мощности накачки и длины волны возбуждающего лазера на эти спектры. Увеличение температуры измерения приводит к уменьшению интенсивности ФЛ Н- и Р-линий с энергиями гашения 34.9 и 12.8 meV для Н- и Р-линий соответственно. Для Н-линии значение энергии зависит от условий изготовления образца, тогда как для Р-линии не зависит от используемой технологии. Интенсивности люминесценции W-, Н- и Р-линий, а также интегральная интенсивность дефектной полосы возрастают с увеличением мощности возбуждения. Впервые определены эффективности возбуждения ФЛ для W-, Р- и Н-центров: $1 \cdot 10^{-19}$, $10 \cdot 10^{-19}$ и $4.8 \cdot 10^{-19}$ cm²·s соответственно. Установлено, что центры люминесценции узких линий и дефектной полосы расположены в модифицированном при лазерном облучении приповерхностном слое.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- P.McL. Colley, E.C. Lightowlers. Semicond. Sci. Technol., 2, 157 (1987). DOI: 10.1088/0268-1242/2/3/005
- [2] G. Davies. Phys. Rep., 176, 83 (1989).
 DOI: 10.1016/0370-1573(89)90064-1
- [3] M.A. Manheimer. IEEE Trans. Appl. Supercond., 25 (3), 1 (2015). DOI: 10.1109/TASC.2015.2399866
- [4] J.M. Shainline, S.M. Buckley, R.P. Mirin, S.W. Nam. Phys. Rev. Appl., 7, 034013 (2017).

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.034013

- [5] J.M. Shainline, J. Xu. Laser Photon. Rev., 1 (4), 334 (2007).
 DOI: 10.1002/lpor.200710021
- [6] S. Buckley, J. Chiles, A.N. McCaughan, G. Moody, K.L. Silverman, M.J. Stevens, R.P. Mirin, S. Nam, J.M. Shainline. Appl. Phys. Lett., **111**, 141101 (2017). DOI: 10.1063/1.4994692
- [7] C. Beaufils, W. Redjem, E. Rousseau, V. Jacques, A.Yu. Kuznetsov, C. Raynaud, C. Voisin, A. Benali, T. Herzig, S. Pezzagna, J. Meijer, M. Abbarchi, G. Cassabois. Phys. Rev. B, 97, 035303 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevB.97.035303
- [8] C. Chartrand, L. Bergeron, K.J. Morse, H. Riemann, N.V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, S. Simmons, M.L.W. Thewalt. Phys. Rev. B, 98, 195201 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevB.98.195201
- [9] M. Hollenbach, N. Klingner, N.S. Jagtap, L. Bischoff, C. Fowley, U. Kentsch, G. Hlawacek, A. Erbe, N.V. Abrosimov, M. Helm, Y. Berencén, G.V. Astakhov. Nat. Commun., 13, 7683 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-35051-5
- [10] M. Hollenbach, N.S. Jagtap, C. Fowley, J. Baratech, V. Guardia-Arce, U. Kentsch, A. Eichler-Volf, N.V. Abrosimov, A. Erbe, S. ChaeHo, K. Hakseong, M. Helm, Woo Lee, G.V. Astakhov, Y. Berencén. J. Appl. Phys., **132**, 033101 (2022). DOI: 10.1063/5.0094715
- [11] R. Kuladeep, L. Jyothi, C. Sahoo, D. Narayana Rao, V. Saikiran. J. Mater. Sci., 57 (3), 1863 (2022).
 DOI: 10.1007/s10853-021-06712-5
- [12] A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Rudenko, L.V. Seleznev,
 D.V. Sinitsyn, S.V. Makarov. Opt. Mater. Express, 7 (8), 2793 (2017). DOI: 10.1364/OME.7.002793
- [13] S.I. Kudryashov, T. Pflug, N.I. Busleev, M. Olbrich, A. Horn, M.S. Kovalev, N.G. Stsepuro. Opt. Mater. Express, **11** (1), 1 (2021). DOI: 10.1364/OME.412790
- [14] M.I. Sanchez, P. Delaporte, Y. Spiegel, B. Franta, E. Mazur, T. Sarnet. Phys. Status Solidi A, 218, 2000550 (2021). DOI: 10.1002/pssa.202000550
- [15] J.-H. Zhao, X.-B. Li, Q.-D. Chen, Z.-G. Chen, H.-B. Sun. Mater. Today Nano, 11, 100078 (2020).
 DOI: 10.1016/j.mtnano.2020.100078
- [16] X. Liu, B. Radfar, K. Chen, O.E. Setälä, T.P. Pasanen, M. Yli-Koski. IEEE Trans. Semicond. Manuf., **35** (3), 504 (2022). DOI: 10.1109/TSM.2022.3190630
- [17] Dongkai Chu, Peng Yao, Chuanzhen Huang. Opt. Laser Technol., 136, 106790 (2021).
 DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106790
- [18] V. Zorba, L. Persano, D. Pisignano, A. Athanassiou,
 E. Stratakis, R. Cingolani, P. Tzanetakis, C. Fotakis. Nanotechnology, 17, 3234 (2006).
 DOI: 10.1088/0957-4484/17/13/026

- [19] D. Angelaki, P. Kavatzikidou, C. Fotakis, E. Stratakis,
 A. Ranella. Mater. Sci. Eng. C, 115, 111144 (2020).
 DOI: 10.1016/j.msec.2020.111144
- [20] Quan Lü, Jian Wang, Cong Liang, Li Zhao, Zuimin Jiang. Opt. Lett., 38 (8), 1274 (2013). DOI: 10.1364/OL.38.001274
 [21] A. Rämer, O. Osmani, B. Rethfeld. J. Appl. Phys., 116, 053508
- (2014). DOI: 10.1063/1.4891633
- [22] А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин. УФН, 187 (2), 159 (2017). DOI: 10.3367/UFNr.2016.09.037974
- [23] О.А. Акципетров, И.М. Баранова, К.Н. Евтюхов. *Нели*нейная оптика кремния и кремниевых наноструктур (Физматлит, М., 2012), с. 544, ISBN 978-5-9221-1402-8
- [24] A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.O. Levchenko, L.V. Nguyen, I.N. Saraeva, A.A. Rudenko, E.I. Ageev, D.V. Potorochin, V.P. Veiko, E.V. Borisov, D.V. Pankin, D.A. Kirilenko, P.N. Brunkov. Appl. Surf. Sci., **416**, 988 (2017). DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.04.215
- [25] P.J. Dean, J.R. Haynes, W.F. Flood. Phys. Rev., 161, 711 (1967). DOI: 10.1103/PhysRev.161.711
- [26] G. Davies, S. Hayama, L. Murin, R. Krause-Rehberg, V. Bondarenko, A. Sengupta, C. Davia, A. Karpenko. Phys. Rev. B, 73, 165202 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevB.73.165202
- [27] P.K. Giri. Semicond. Sci. Technol., 20, 638 (2005).
 DOI: 10.1088/0268-1242/20/6/027
- [28] B.J. Coomer, J.P. Goss, R. Jones, S. Oberg, R. Broddon. Physica B, 273–274, 505 (1999).
 DOI: 10.1016/S0921-4526(99)00538-4
- [29] Yu. Yang, J. Bao, C. Wang, M.J. Aziz. J. Appl. Phys., 107, 123109 (2010). DOI: 10.1063/1.3436572
- [30] Н.А. Соболев, К.Ф. Штельмах, А.Е. Калядин, Е.И. Шек. ФТП, 49 (12), 1700 (2015).
 DOI: 10.1134/S1063782615120209
- [31] N.S. Minaev, A.V. Mudryi. Phys. Status Solidi A, 68, 561 (1981). DOI: 10.1002/pssa.2210680227
- [32] Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, К.Ф. Штельмах, Е.И. Шек, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков. ФТП, 56 (6), 542 (2022). DOI: 10.21883/FTP.2022.06.52585.9832
- [33] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Б.П. Захарченя, П.Е. Пак, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, И.Н. Яссиевич, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин. ФТП, **30** (5), 898 (1996).
- [34] M. Kittler, M. Reiche, T. Arguirov, W. Seifert, X. Yu. Phys. Status Solidi A, 203 (4), 802 (2006).
 DOI: 10.1002/pssa.200564518