03

Фотолюминесценция, связанная с дислокациями в кремнии, пластически деформированном при изгибе центральной симметрии

© В.В. Емцев, Н.А. Соболев, Г.А. Оганесян, А.Е. Калядин, В.В. Топоров, Д.С. Полоскин, А.М. Маляренко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург Россия

E-mail: emtsev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 21 мая 2025 г.
В окончательной редакции 22 мая 2025 г.
Принята к публикации 22 мая 2025 г.

Исследована дислокационная фотолюминесценция в кремниевых пластинах, подвергнутых изгибу центральной симметрии с помощью кольцевого пуансона, который ранее никогда не использовался для этой цели. Оригинальная методика, эффективность которой была продемонстрирована совсем недавно в экспериментах с кремниевыми пластинами при деформации изгиба, позволяет одновременно определять механическое напряжение на растянутой и сжатой сторонах тестовой пластины по заметному сдвигу полосы $520.5\,\mathrm{cm}^{-1}$ в спектрах комбинационного рассеяния света. Пластическая деформация пластины под механической нагрузкой проводилась при температуре $T = 700\,^{\circ}\mathrm{C}$ в течение одного часа. Показано, что на растянутой стороне тестовой пластины (вне центральной части) проявляются все четыре известные полосы дислокационной люминесценции (далее линии *D1*–*D4*) и протяженные дефекты упаковки {113}. На сжатой стороне пластины (вне центральной части) отчетливо видны линии *D3* и *D4*, а также линия межзонной люминесценции, но отсутствуют линии *D1* и *D2*. При приближении к центру тестовой пластины с остаточной деформацией линии *D3* и *D4* преобладают на растянутой и сжатой сторонах, а линия *D4* доминирует в самом центре. Таким образом, для кремния, подвергнутого пластической деформации под действием растягивающих и сжимающих напряжений, создаваемых в режиме изгиба центральной симметрии, выявлены существенные изменения в дислокационной фотолюминесценции.

Ключевые слова: кремний, изгиб центральной симметрии, пластическая деформация, фотолюминесценция.

DOI: 10.61011/FTT.2025.05.60743.135-25

1. Введение

Известно, что кремний не относится к классу прямозонных полупроводников и вследствие этого имеет низкую эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда. Эффективность излучательной рекомбинации в кремнии на несколько порядков ниже, чем в прямозонных полупроводниковых материалах. Тем не менее, создание светодиодов с длиной волны $\sim 1.5\,\mu\mathrm{m}$ на основе кремния, важных для системной интеграции микроэлектронных и оптических компонентов, остается актуальной технической задачей [1]. Для улучшения излучательных свойств кремния используются различные подходы, один из которых основан на формировании протяженных структурных дефектов, таких как дислокации. Фотолюминесценция, связанная с наличием дислокаций, впервые наблюдалась в кремниевых пластинах [2,3], деформированных в условиях четырехточечного изгиба при $T = 850\,^{\circ}\mathrm{C}$, часто после предварительного нанесения царапин алмазной иглой. В спектрах фотолюминесценции пластически деформированного кремния наблюдались четыре характерные полосы, связанные с дислокациями, среди них линии *D1* (0.812 eV), *D2* (0.875 eV), *D3* (0.934 eV) и *D4* (1.000 eV). Дальнейшие исследования дислокационной люминесценции, в том числе на поликристаллическом кремнии, позволили сделать вывод, что линии *D3* и *D4* образуют пару, тогда как линии *D1* и *D2* не являются парой, а имеют разное происхождение [4]. Интенсивность этих линий оказалась пропорциональной плотности дислокаций [2]. Стоит отметить, что линии *D1*–*D4* в спектрах фотолюминесценции оказались устойчивыми к деградации при нагреве выше комнатной температуры [5]. С другой стороны, интенсивность линий выявляет сильный эффект гашения, начиная с криогенных температур, $T < 300\,\mathrm{K}$. Это является основным препятствием для практического использования дислокационной фотолюминесценции. При изготовлении кремниевых светодиодов большой интерес представляет линия *D1*, обладающая более высокой термостабильностью [5], поскольку она соответствует окну прозрачности волоконной оптики. Используя различные технологические приемы при изготовлении кремниевых структур, удалось воспроизводить эту линию даже при комнатной температуре [6]. Необходимо отметить еще одну особенность. Увеличение плотности дислокаций связано с перераспределением интенсивности дислокационной фотолюминесценции в области линии *D1*. Вместо относительно узкой линии *D1* (с полушириной 5–10 meV) при криогенных температурах появляется широкая полоса (с полушириной около 80 meV), состоящая из нескольких неразрешенных линий [5]. Принято считать, что полоса *D1* охватывает спектраль-

ный диапазон 750–850 meV. Контур рассматриваемой полосы зависит от технологии выращивания кристалла. В действительности в кристаллах кремния, выращенных по методу плавающей зоны, наиболее интенсивная область дислокационной фотолюминесценции приходится на длинноволновое крыло полосы *D1*. Напротив, в кристаллах кремния, выращенных по методу Чохральского, коротковолновое крыло полосы *D1* выражено гораздо сильнее [7,8]. Кроме того, плотность дислокаций также влияет на изменение контура спектров фотолюминесценции. При сравнительно низкой плотности дислокаций $N_D \approx 10^6\,\mathrm{cm}^{-2}$ доминирующими в спектрах оказались полосы *D1* и *D2* с полушириной около 5 meV [5]. Вместе с тем, значительное увеличение плотности дислокаций до $N_D \geq 10^8\,\mathrm{cm}^{-2}$ усиливает роль примеси кислорода в кремнии, приводя к изменению контура полос фотолюминесценции. При низких концентрациях кислорода $\mathrm{O}_i \approx 10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$ более выражено длинноволновое крыло полосы *D1*, тогда как в богатых кислородом кристаллах кремния доминирует коротковолновое этой полосы.

Несмотря на длительные исследования протяженных дефектов упаковки таких как дислокации в кремнии, детальная информация об их атомной структуре далеко не полная. Наряду с такими протяженными дефектами как дислокации различных типов, пластическая деформация кремния может также приводить к образованию других протяженных структурных дефектов, среди которых известны так называемые стержневые дефекты (rodlike defects), обозначаемые в литературе как дефекты упаковки {113}. Эти дефекты упаковки оказались ответственными за полосу с длиной волны $\approx 1.37\,\mu$m в спектрах фотолюминесценции [9]. Их атомная структура до сих пор надежно не установлена и были предложены различные модельные концепции этих дефектов; см., например, [10–12]. Как отмечалось выше, на формирование центров люминесценции, связанных с дислокациями, в кремнии сильно влияет наличие примеси кислорода. Прежде всего, это справедливо для кристаллов кремния, выращенных по методу Чохральского. Термический отжиг образцов кремния, богатых кислородом, запускает процессы агрегации атомов кислорода, вызывая появление преципитатов, которые взаимодействуют с дислокациями. При определенных условиях это позволяет получать светоизлучающие структуры с линией *D1* при комнатной температуре, что, в принципе, совместимо с промышленной технологией изготовления интегральных схем [6,13–15]. Однако, с другой стороны, дислокации, декорированные кислородными преципитатами, также могут выступать эффективными центрами безызлучательной рекомбинации [16,17]. Следует отметить, что вопросы, связанные с дислокационной фотолюминесценцией в кремнии, остаются актуальными и требуют дальнейших экспериментов, в том числе без эффектов, обусловленных присутствием примеси кислорода. Так, например, недавно было показано, что интенсивная линия *D1* в спектрах фотолюминесценции может наблюдаться и при наличии „чистых“ дислокаций (без кислородных преципитатов) [18].

В настоящей статье представлены результаты сравнительного исследования дислокационной фотолюминесценции, наблюдаемой на сжатых и растянутых сторонах кремниевых пластин после высокотемпературной пластической деформации. Новым элементом таких экспериментов является формирование дислокаций в кремниевых пластинах, подвергнутых изгибу центральной симметрии при использовании кольцевого пуансона, ранее не применявшегося для таких целей. Это позволяет на порядок величины увеличить механическое напряжение в пластинах кремния при упругой деформации по сравнению с известным методом четырехточечного изгиба. Кроме того, оригинальное устройство, используемое в настоящих экспериментах, позволяет одновременно определять механические напряжения на растянутой и сжатой сторонах тестовой пластины, подвергаемой механическому нагружению.

2. Техника эксперимента

Объектами исследования были почти круглые кремниевые пластины с диаметром ~ 40 mm и толщиной 0.4 mm, полированные с обеих сторон. Пластины с ориентацией поверхности (111) были вырезаны из кристалла кремния *n*-типа, выращенного по методу Чохральского (Cz–Si). Концентрация растворенного кислорода в образцах составляла $9.3 \cdot 10^{17}\,\mathrm{cm}^{-3}$. Кристалл кремния был слабо легирован фосфором, концентрация которого не превышала $1 \cdot 10^{14}\,\mathrm{cm}^{-3}$.

В данной работе использовалось экспериментальное устройство, ранее описанное в [19–21]. Пластины устанавливались на кольцевую опору диаметром 18 mm, а затем подвергались упругому изгибу центральной симметрии круглым пуансоном диаметром 6 mm [22]. При такой схеме механического нагружения кремниевая пластина растягивается с одной стороны и сжимается с другой. Спектры регистрировались с использованием метода комбинационного рассеяния света. Установка включала в себя автоматизированный двойной дифракционный монохроматор ДФС-24 с фотоэлектронным умножителем Hamamatsu R943-02, который охлаждался до $T = -40\,^\circ$C и работал в режиме счета фотонов. Спектральное разрешение составляло $\sim 2.2\,\mathrm{cm}^{-1}$. Спектры комбинационного рассеяния света возбуждались излучением твердотельного лазера на алюмоиттриевом гранате с длиной волны 532 nm (2.32 eV) и мощностью 40 mW. Все спектры регистрировались в диапазоне от 470 до $540\,\mathrm{cm}^{-1}$. Частотная калибровка спектрометра проводилась с помощью ртутной лампы по спектральной линии 546.072 nm. Погрешность определения частоты оптического фонона не превышала $\pm 0.1\,\mathrm{cm}^{-1}$. Мощность излучения, падающего на тестовую пластину, составляла ~ 30 mW, интенсивность излучения — около

$1\,\mathrm{kW/cm^2}$. При этих условиях не наблюдалось заметного локального нагрева кремниевых пластин.

Оптические измерения при комнатной температуре проводились в геометрии обратного рассеяния. Спектры комбинационного рассеяния света регистрировались в исходном состоянии (до нагружения) и после приложения механического напряжения. В последнем случае все спектры одновременно регистрировались как с фронтальной поверхности тестовой пластины (растянутой стороны), так и с ее тыльной поверхности (сжатой стороны). Величина механических напряжений на растянутой и сжатой сторонах пластины может быть определена по частотному сдвигу характерной фононной линии на $520.5\,\mathrm{cm^{-1}}$. Сдвиг этой линии позволяет рассчитать величину приложенного к пластине механического напряжения. Чтобы описать основные этапы оценки механического напряжения, рассмотрим краткий путь подобных расчетов.

Известно, что в спектрах комбинационного рассеяния света в кремнии под действием механического напряжения полосы, связанные с фононными модами кристаллической решетки, демонстрируют сдвиг и расщепление. Трижды вырожденные ветви оптических фононов F_{2g} расщепляются на синглет и дублет. Следует подчеркнуть, что при обратном рассеянии света от поверхности (111) присутствуют обе моды колебаний: продольная (синглет) и поперечная (дублет). Для используемой геометрии рассеяния света в нашем случае $z(xy)\bar{z}$ синглет отсутствует, а появляется только дублет; см., например, [20]. Тогда сдвиг характерной частоты фононной линии в рамановских спектрах при рассматриваемом изгибе определяется из уравнения

$$\Delta\omega_d = \frac{2(S_{11}+2S_{12})(p+2q)\sigma + S_{44}\sigma_r}{6\omega_0}, \qquad (1)$$

где $\omega_0 = 520.5\,\mathrm{cm^{-1}}$ (частота оптического фонона); $p=-1.43\omega_0^2$, $q=-1.89\omega_0^2$, $r=-0.59\omega_0^2$ (ангармонические параметры); $S_{11}=7.68\cdot10^{-12}\,\mathrm{Pa^{-1}}$, $S_{12}=-2.14\cdot10^{-12}\,\mathrm{Pa^{-1}}$, $S_{44}=12.7\cdot10^{-12}\,\mathrm{Pa^{-1}}$ (константы упругой податливости в кремнии при температуре $T=300\,\mathrm{K}$ [23–26]). На растянутой стороне тестовой пластины в условиях изгиба в наших экспериментах при механическом напряжении $\sigma = 1.0\,\mathrm{GPa}$ расчетный сдвиг поперечной моды от поверхности Si(111) составляет

$$\Delta\omega_d = -3.72\,\mathrm{cm^{-1}}. \qquad (1a)$$

Тогда на сжатой стороне тестовой пластины сдвиг этой фононной линии в рамановских спектрах оценивается по другому уравнению [20]

$$\Delta\omega_h = \frac{\sigma(p+2q)(S_{11}+2S_{12})}{3\omega_0}, \qquad (2)$$

где $\Delta\omega_h$ — сдвиг частоты рассматриваемой линии при механическом сжатии. При этом расчетный сдвиг частоты характерной фононной линии при сжимающем напряжении $\sigma = 1.0\,\mathrm{GPa}$ определяется как

$$\Delta\omega_h = 3.07\,\mathrm{cm^{-1}}. \qquad (2a)$$

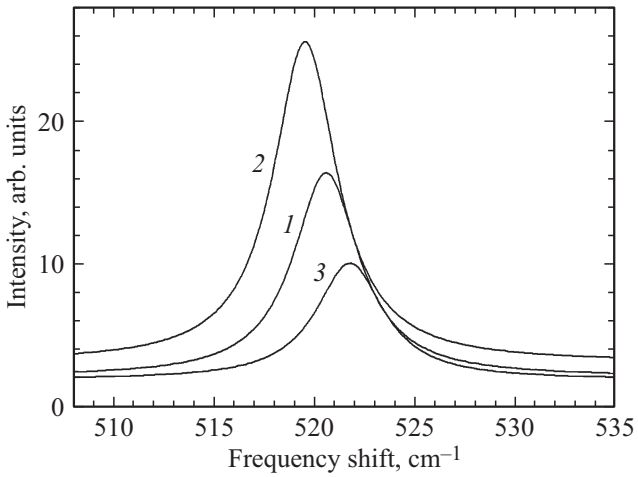


Рис. 1. Частотные сдвиги характерной фононной линии для кремниевой пластины при упругих растягивающих и сжимающих напряжениях. Линия до механического нагружения — кривая *1*; линия на растянутой стороне пластины — кривая *2*; линия на сжатой стороне пластины — кривая *3*.

Указанные частотные сдвиги характерной фононной линии, вызванные механическими напряжениями при растяжении (1a) и сжатии (2a), использовались в качестве опорных значений для оценки в настоящей работе.

Как показано на рис. 1, мы действительно наблюдали сдвиг характерных линий под действием упругого механического напряжения, приложенного к тестовой пластине, которая затем подвергалась высокотемпературной пластической деформации. Как уже указывалось выше, характерные фононные линии могут быть одновременно зарегистрированы в нашем устройстве с обеих сторон кремниевой пластины, как до, так и после механического нагружения.

В наших экспериментальных условиях сдвиг частоты для растянутой стороны составляет $1.06\,\mathrm{cm^{-1}}$, что соответствует механическому напряжению 0.28 GPa. Для сжатой стороны сдвиг частоты характерной фононной линии $1.17\,\mathrm{cm^{-1}}$ достигается при механическом напряжении 0.38 GPa. Стоит отметить, что приведенные выше значения относятся к максимально достижимым в используемом экспериментальном устройстве *упругой деформации* кремниевой пластины при комнатной температуре. Для образования в тестовой пластине протяженных структурных дефектов типа дислокаций требуется ее *пластическая деформация* при более высоких температурах. В нашем случае высокотемпературное деформирование кремниевой пластины после механического нагружения происходило в атмосфере сухого азота при $T = 700\,^\circ\mathrm{C}$ в течение одного часа. Важно понимать, что механическое напряжение при

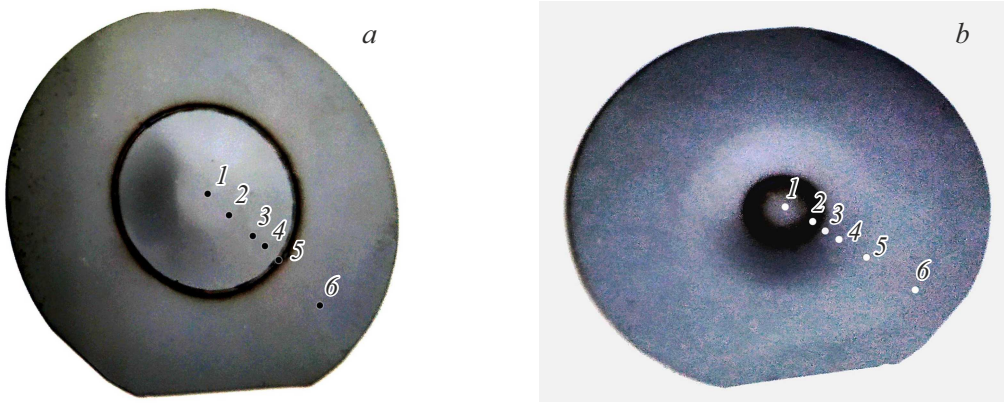


Рис. 2. Поверхности кремниевой пластины после высокотемпературной пластической деформации при растяжении (a) и сжатии (b). Области пластины, в которых снимались спектры фотолюминесценции, обозначены точками от *1* до *6*.

высокотемпературной пластической деформации кремниевой пластины становится несколько меньше, чем при упругой деформации, но количественная оценка этого изменения в наших экспериментальных условиях невозможна. При таком высокотемпературном нагреве деформировалась центральная часть пластины; растянутая сторона кремниевой пластины стала выпуклой, а сжатая — вогнутой. Обе поверхности пластически деформированной пластины показаны на рис. 2.

Измеряя сдвиги характерной фононной линии, можно определить механическое напряжение после высокотемпературной деформации. Остаточные напряжения в центральной части деформированной пластины оказались равными 0.08 и 0.16 GPa на растянутой (выпуклой) и сжатой (вогнутой) сторонах пластины, соответственно. Вне деформированных центральных областей остаточное напряжение на внешнем плато постепенно уменьшается до нуля на растянутой стороне и до ≈ 0.02 GPa на сжатых сторонах пластины; (см. рис. 2, a и b) точка *6*.

Затем на основе спектров фотолюминесценции, снятых в пластически деформированной пластине, изучалось образование дислокаций и других протяженных структурных дефектов. Люминесценция возбуждалась лазером с длиной волны $\lambda = 532$ nm и мощностью до 40 mW. Спектры фотолюминесценции в диапазоне температур $10 \leq T \leq 200$ K регистрировались с помощью монохроматора МДР-23 и фотодиода AlGaAs, работающего при комнатной температуре. Оптическое разрешение установки составляло 5 nm.

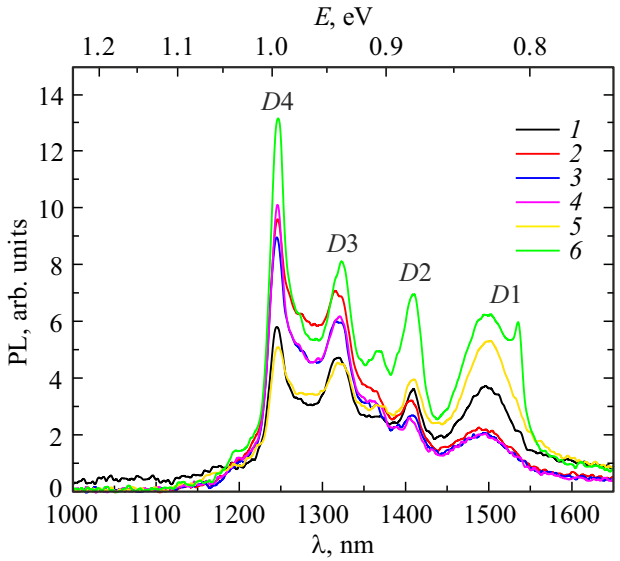


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции, зарегистрированные в различных точках кремниевой пластины после высокотемпературной пластической деформации при растяжении (в цвете онлайн). Точки, в которых регистрировались спектры, обозначены цифрами от *1* до *6* (см. рис. 2, a).

3. Экспериментальные результаты

3.1. Пластина после высокотемпературной пластической деформации при растяжении

На растянутой стороне пластины в области, которая находилась вне кольцевой опоры (см. рис. 2, a, точка *б*), в спектре фотолюминесценции, представленном на рис. 3, отчетливо видны все четыре линии $D1$–$D4$, связанные с образованием дислокаций, а также линия, обусловленная появлением протяженных дефектов упаковки, известных в литературе как структурный дефект {113}.

Наиболее интенсивная дислокационная линия в спектре оказалась связанной с линией $D4$. Мы полагаем, что левое крыло линии $D1$ обусловлено преципитатами кислорода. В области контакта кремниевой пластины с кольцевой опорой в процессе высокотемпературной пластической деформации (рис. 2, a, точка *5*) интен-

сивность всех четырех линий в спектре фотолюминесценции, показанном на рис. 3, существенно падает, а контур линий несколько изменяется по сравнению со спектром, полученным на плато в точке *6*; см. выше. По мере приближения к центру пластически деформированной пластины (рис. 2, *a*, точки *4* → *2*) в спектре фотолюминесценции, показанном на рис. 3, заметно преобладают линии *D3* и *D4*. В самом центре пластины, подвергнутой высокотемпературной пластической деформации (рис. 2, *a*, точка *1*), наблюдается значительное уменьшение интенсивности всех линий в спектре фотолюминесценции, оставляя доминирующей линию *D4*; см. рис. 3. Кроме того, контур спектра в области линии *D1* позволяет полагать, что эта линия практически отсутствует, а ближайшая широкая полоса связана с образованием преципитатов кислорода.

3.2. Пластина после высокотемпературной пластической деформации при сжатии

На сжатой стороне кремниевой пластины, в области, которая находилась вне кольцевой опоры (см. рис. 2, *b*, точка *6*), в спектре фотолюминесценции, показанном на рис. 4, отчетливо видны линии *D3* и *D4*, а также линия межзонной люминесценции.

Однако линии *D1* и *D2* в спектре не видны. В области соприкосновения пластины с кольцевой опорой в процессе высокотемпературной пластической деформации (рис. 2, *b*, точка *5*) спектр фотолюминесценции, представленный на рис. 4, сохраняет общий вид имеющихся линий, но их интенсивность становится заметно меньше. Так, например, интенсивность линии межзонной люминесценции падает почти в пять раз, а интенсивность линий *D3* и *D4* уменьшается в полтора раза. По мере приближения к центральной области пластины (рис. 2, *b*, точки *4* → *3*) интенсивность линий *D3* и *D4* в спектре фотолюминесценции изменяется незначительно, см. рис. 4. Однако уже при контакте кольцевой опоры с пластиной (рис. 2, *b*, точка *2*) в спектре фотолюминесценции, показанном на рис. 4, надежно регистрируются все четыре линии *D1*–*D4*. Такой же вывод можно сделать относительно спектра, полученного в самом центре пластины, пластически деформированной при сжатии (рис. 2, *b*, точка *1*): в спектре фотолюминесценции, показанном на рис. 4, интенсивность линий *D3* и *D4* несколько увеличивается, оставляя две другие линии практически неизменными.

3.3. Влияние температуры измерений и мощности накачки на спектры фотолюминесценции, связанной с дислокациями

В качестве иллюстрации на рис. 5 показаны спектры фотолюминесценции, зарегистрированные в самом центре пластины после высокотемпературной пластической деформации при сжатии (рис. 2, *b*, точка *1*).

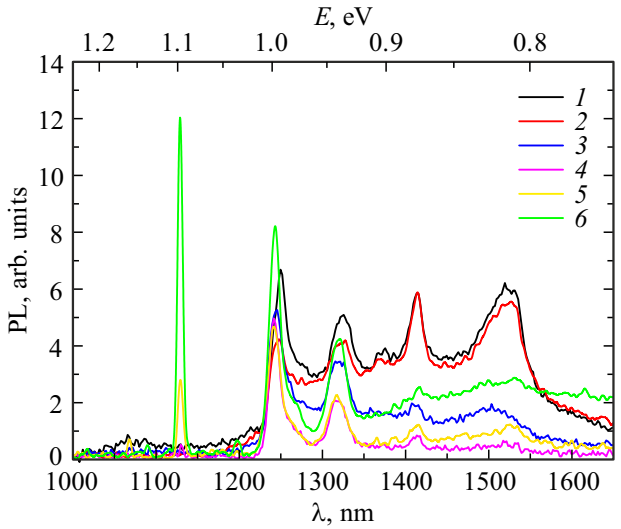


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции, зарегистрированные в различных точках кремниевой пластины после высокотемпературной пластической деформации при сжатии (в цвете онлайн). Точки, в которых регистрировались спектры, обозначены цифрами от *1* до *6* (см. рис. 2, *b*). Следование полос *D1*–*D4* в спектрах фотолюминесценции, связанных с дислокациями, см. рис. 3.

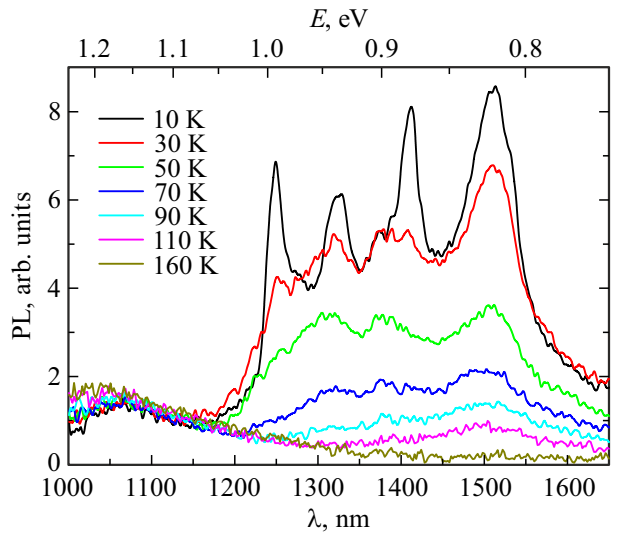


Рис. 5. Зависимость спектров фотолюминесценции от температуры измерений. Спектры снимались в центре кремниевой пластины после высокотемпературной пластической деформации при сжатии (в цвете онлайн). Точка *6*, в которой регистрировались спектры; см. рис. 2, *b*. Следование полос *D1*–*D4* в спектрах фотолюминесценции, связанных с дислокациями, см. рис. 3.

В спектре фотолюминесценции, измеренном при $T = 10$ K, отчетливо видны все четыре линии *D1*–*D4*; см. рис. 5. Эффекты гашения интенсивности линий фотолюминесценции, связанных с дислокациями, начинаются сразу с повышением температуры измерений до

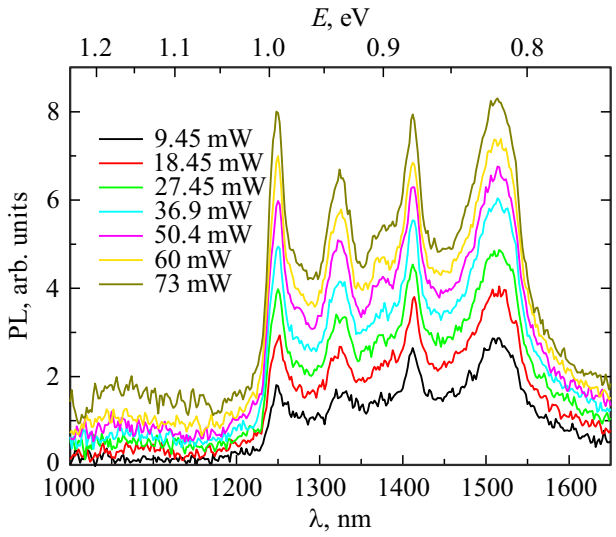


Рис. 6. Влияние мощности накачки на спектры дислокационной фотолюминесценции, полученные в центре кремниевой пластины после высокотемпературной пластической деформации при сжатии (в цвете онлайн). Температура измерений $T = 10$ K. Точка 6, в которой были получены спектры; см. рис. 2, *b*. Следование полос *D1*–*D4* в спектрах фотолюминесценции, связанных с дислокациями, см. рис. 3.

$T = 30$ K. Как видно из этого рисунка, с повышением температуры измерений интенсивность всех линий люминесценции в спектрах резко уменьшается и наблюдается значительное уширение этих линий. Линия *D4* исчезает быстрее остальных, и это справедливо также для аналогичных кремниевых пластин с дислокациями, полученными разными технологическими методами [13]. На самом деле линии *D*2–*D*4 постепенно теряют свой первоначальный контур. При дальнейшем повышении температуры измерений до $T = 50$ K происходит прогрессирующая деградация спектров фотолюминесценции, поэтому с некоторой степенью уверенности можно идентифицировать только линию *D1*; см. рис. 5. Спектры фотолюминесценции, зарегистрированные при $T \geq 70$ K, в целом оказываются неинформативными.

Интересно также влияние мощности накачки на спектры дислокационной фотолюминесценции. В качестве примера на рис. 6 приведены спектры люминесценции, полученные при $T = 10$ K в самом центре кремниевой пластины после высокотемпературной пластической деформации при сжатии (рис. 2, *b*, точка *1*).

Уже при минимальной мощности накачки 9.45 mW в спектре фотолюминесценции появляются все четыре линии *D1*–*D4*. При увеличении мощности накачки до 73 mW положение всех линий остается неизменным, а их интенсивность резко возрастает, но соотношение интенсивностей линий сохраняется практически постоянным. Кроме того, при максимальной мощности накачки можно наблюдать также линию на $\approx 1.37\,\mu$m, связанную с наличием протяженных дефектов упаковки, называемых в литературе структурными дефектами {113}.

4. Заключение

В представленных экспериментах исследованы спектры фотолюминесценции, связанной с образованием дислокаций и других протяженных структурных дефектов в кремнии. С этой целью кремниевые пластины подвергались высокотемпературной пластической деформации при изгибе центральной симметрии. Отметим, что такой метод введения протяженных структурных дефектов в кремний в условиях растяжения и сжатия ранее не использовался. Исследования спектров фотолюминесценции, связанной с наличием дислокаций в тестовых пластинах кремния, позволило детально рассмотреть характерные особенности их формирования вследствие высокотемпературной пластической деформации при растяжении и сжатии. Как для растянутой, так и для сжатой сторон тестовой пластины оказалось, что в спектре фотолюминесценции, снятом в самом центре пластины, доминирует линия *D4*. Ее интенсивность существенно возрастает с увеличением мощности накачки. Наряду с линией *D4* для растянутой стороны кремниевой пластины, подвергнутой высокотемпературной пластической деформации, в спектрах фотолюминесценции обнаружено также наличие протяженных дефектов упаковки, известных как структурные дефекты {113}. Интересно, что на сжатой стороне пластически деформированной кремниевой пластины, вне ее контакта с кольцевой опорой при высокотемпературной пластической деформации, в спектрах фотолюминесценции проявляются две интенсивные линии *D3* и *D4*, а также линия межзонной люминесценции. Также отмечены заметные изменения интенсивности всех линий, связанных с дислокациями и другими протяженными структурными дефектами в различных областях пластически деформированной кремниевой пластины.

Конфликт интересов

Авторы декларируют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] N. Margalit, C. Xiang, S.M. Bowers, A. Bjorlin, R. Blum, J.E. Bowers. Appl. Phys. Lett. **118**, 220501 (2021). https://doi.org/10.1063/5.0050117
[2] Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, О.В. Феклисова, Е.Б. Якимов. Физика и техника полупроводников **55**, *7*, 550 (2021). https://doi.org/10.21883/FTP.2021.07.51014.9651
[3] Н.А. Дроздов, А.А. Патрин, В.Д. Ткачев. Письма ЖЭТФ, **23**, *11*, 651 (1976).
[4] M. Reiche, M. Kittler. Crystals **6** (7), 74 (2016). https://doi.org/10.3390/cryst6070074

[5] E.A. Steinman. Physics of the Solid State **47**, 5 (2005). https://doi.org/10.1134/1.1853432
[6] N.A. Sobolev, A.E. Kalyadin, K.F. Shtel'makh, P.N. Aruev, V.V. Zabrodskiy, E.I. Shek. Semiconductors **57**, 283 (2023). DOI: 10.61011/SC.2023.04.56427.4810
[7] E.A. Steinman, V.V. Kveder, V.I. Vdovin, H.G. Grimmeiss. Solid State Phenomena **69-70**, 23 (1999). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.69-70.23
[8] S. Pizzini, M. Guzzi, E. Grilli, G. Borionetti. Journal of Physics: Condensed Matter **12**, 10131 (2000). https://doi.org/10.1088/0953-8984/12/49/312
[9] A.E. Kalyadin, K.F. Shtel'makh, P.N. Aruev, V.V. Zabrodski, K.V. Karabeshkin, E.I. Shek, N.A. Sobolev. Semiconductors **54**, 687 (2020). https://doi.org/10.1134/S1063782620060081
[10] S. Takeda. Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L639 (1991). https://doi.org/10.1143/JJAP.30.L639
[11] L.I. Fedina, A.K. Gutakovskii, A.V. Latyshev, A.L. Aseev. In: Advances in Semiconductor Nanostructures, Growth, Characterization, Properties and Applications, ed by A. Latyshev, A. Dvurechenskii, A. Aseev (Elsevier, Amsterdam, 2016) p. 383.
[12] L. Jeyanathan, E.C. Lightowlers, V. Higgs, G. Davies. Mater. Sci. Forum **143**–**147**, 1499 (1994). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.143-147.1499
[13] S. Binetti, S. Pizzini, E. Leoni, R. Somaschini, A. Castaldini, A. Cavallini. J. Appl. Phys. **92**, 2437 (2002). https://doi.org/10.1063/1.1497450
[14] K. Bothe, R.J. Falster, J.D. Murphy. Appl. Phys. Lett. **101**, 032107 (2012). https://doi.org/10.1063/1.4737175
[15] S. Binetti, R. Somaschini, A. LeDonne, E. Leoni, S. Pizzini, D. Li, D. Yang. J. Phys.: Condens. Matter **14**, 13247 (2002). https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/48/375
[16] N.A. Sobolev, A.E. Kalyadin, K.F. Shtel'makh, E.I. Shek, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov. Semiconductors **56**, 390 (2022). DOI: 10.21883/SC.2022.06.53535.9832
[17] A. Borghesi, B. Pivac, A. Sassella, A. Stella. J. Appl. Phys. **77**, 4169 (1995). https://doi.org/10.1063/1.359479
[18] V.I. Vdovin, L.I. Fedina, A.K. Gutakovskii, A.E. Kalyadin, E.I. Shek, K.F. Shtel'makh, N.A. Sobolev. Crystallography Reports **66**, 625 (2021). DOI: 10.1134/s1063774521040210
[19] G.A. Oganesyan, I.I. Novak. Journal of Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **3**, 962 (2009). https://doi.org/10.1134/S1027451009060202
[20] I.I. Novak, V.V. Baptizmanskii, L.V. Zhoga. Opt. Spectrosc. **43**, 145 (1977).
[21] I.I. Novak, G.A. Oganesyan. Journal of Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **1**, 294 (2007). https://doi.org/10.1134/S1027451007030111
[22] V.V. Emtsev, V.V. Toporov, G.A. Oganesyan, A.A. Lebedev, D.S. Poloskin. Physica B: Condensed Matter **684**, 415949 (2024). https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.415949
[23] E. Anastassakis, A. Pinczuk, E. Burstein, F.H. Pollak, M. Cardona. Solid State Communications **8**, 133 (1970). https://doi.org/10.1016/0038-1098(70)90588-0
[24] I.D. Wolf. Semicond. Sci. Technol. **11**, 139 (1990). https://doi.org/10.1088/0268-1242/11/2/001
[25] V. Poborchii, T. Tada, T. Kanayama. Appl. Phys. Lett. **97**, 041915 (2010). https://doi.org/10.1063/1.3474604
[26] A. Gassenq, S. Tardif, K. Guilloy, I. Duchemin, N. Pauc, J.M. Hartmann, D. Rouchon, J. Widiez, Y.M. Niquet, L. Milord, T. Zabel, H. Sigg, J. Faist, A. Chelnokov, F. Rieutord, V. Reboud, V. Calvo. J. Appl. Phys. **121**, 055702 (2017). https://doi.org/10.1063/1.4974202

Редактор В.В. Емцев