

## Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 538.95

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14401>

### ОПТИКО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСАНДВИЧЕЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Н. И. Руль<sup>1, 2</sup> ✉, П. А. Головин<sup>1, 2</sup>, Н. Т. Баграев<sup>2, 1</sup>,  
Л. Е. Клячкин<sup>2</sup>, А. М. Маляренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

✉ [rul.nickolai@mail.ru](mailto:rul.nickolai@mail.ru)

**Аннотация.** С целью выявления возможности фазового контроля терагерцового (ТГц) излучения из кремниевых наносандвич-структур, а также описания взаимосвязи оптических и электрических характеристик подобных наноструктур, в работе проведены измерения спектров модулированной электролюминесценции указанных структур при комнатной температуре. При этом установлена возможность корректировки частоты, амплитуды и фазы ТГц-излучения; зарегистрированы фазовые характеристики продольной проводимости краевых каналов кремниевых negative-U-наносандвичей при высокой температуре (вплоть до комнатной). Проанализированы физические процессы, лежащие в основе наблюдаемых явлений. Эффект охлаждения краевых каналов, способствующий наблюдению высокотемпературных макроскопических квантовых явлений, возникает благодаря наличию сильного обменного взаимодействия между носителями тока в краевых каналах и дипольными центрами бора с отрицательной корреляционной энергией (negative-U-реакция). Объяснение наблюдаемых явлений с помощью квантового эффекта Фарадея подтверждает возможность использования представляемых наноструктур в качестве компонентной базы для кремниевой радиофотоники.

**Ключевые слова:** кремниевый наносандвич, отрицательная корреляционная энергия, дипольный центр бора, терагерцовое излучение

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90130 «Квантовый спиновый эффект Фарадея в низкоразмерных кремниевых negative-U наносандвич-структурах при высоких температурах».

**Для цитирования:** Руль Н. И., Головин П. А., Баграев Н. Т., Клячкин Л. Е., Маляренко А. М. Оптико-электрические фазовые характеристики кремниевых наносандвичей с отрицательной корреляционной энергией // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 4. С. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14401>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14401>

## OPTICAL-ELECTRIC PHASE CHARACTERISTICS OF SILICON NEGATIVE-U NANOSANDWICHES

N. I. Rul'<sup>1, 2</sup> ✉, P. A. Golovin<sup>1, 2</sup>, N. T. Bagraev<sup>2, 1</sup>,  
L. E. Klyachkin<sup>2</sup>, A. M. Malyarenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

✉ [rul.nickolai@mail.ru](mailto:rul.nickolai@mail.ru)

**Abstract:** In order to determine the possibility of the phase control of terahertz (THz) radiation from silicon negative-U nanosandwich structures (NSS), as well as to describe the relationship of optical and electrical characteristics of these NSS, the room-temperature measurement of modulated electroluminescence spectra have been carried out. In so doing, the opportunity to adjust a frequency, an amplitude and a phase of THz radiation was found; the longitudinal conductance phase characteristics of the edge channels of the NSS were recorded at high temperature (up to room one). The physical processes underlying the observed phenomena were analyzed. The edge channels' cooling effect as a contributory factor for observation of the high-temperature macroscopic quantum phenomena arised due to the strong exchange interaction between the charge carriers in the edge channels and the dipole boron centers with negative correlation energy (negative-U reaction). The explanation of the observed phenomena using the quantum Faraday effect made it possible to apply the NSS as a component base for the silicon radiophotonics.

**Keywords:** silicon nanosandwich, negative correlation energy, dipole boron centers, terahertz radiation

**Funding:** The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 20-32-90130 “The quantum spin Faraday effect in the low-dimensional silicon negative-U nanosandwich-structures at high temperatures”.

**For citation:** Rul' N. I., Golovin P. A., Bagraev N. T., Klyachkin L. E., Malyarenko A. M., Optical-electric phase characteristics of silicon negative-U nanosandwiches, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (4) (2021) 9–20. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14401>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Разработка портативных и настраиваемых источников и приемников дальнего инфракрасного и терагерцового (ТГц) диапазонов электромагнитного излучения [2, 6 – 11] является одной из главных и нерешенных проблем современных оптических технологий. Тем не менее кремниевые наносандвичи, полученные в рамках холловской геометрии (рис. 1,а) [1], демонстрируют возможность излучения и приема ТГц-излучения благодаря формированию топологических краевых каналов (рис. 1,б,д), ограниченных тригональными дипольными центрами бора  $2B^0 \rightarrow B^- + B^+$  с отрицательной корреляционной энергией (negative-U) [1, 2] (рис. 1,с). Сложный энергетический спектр носителей тока в краевых каналах кремниевых наносандвичей, а также подавление тепловых переходов, по сравнению с оптическими, вследствие эффекта охлаждения, приводят к возможности наблюдения амплитудной и частотно-модулированной ТГц-электролюминесценции. Наличие амплитудно-частотной ТГц-модуляции инфракрасного (ИК) излучения крайне важно

для его эффективного проникновения в живую материю. Именно возможность подобной модуляции ИК-излучения определяет потенциал исследуемых наноструктур для развития кремниевой радиофоники.

Таким образом, цель данной работы – выявить возможности амплитудно-частотной ТГц-модуляции и фазового контроля излучения из кремниевых наносандвич-структур с отрицательной корреляционной энергией и описать взаимосвязь оптических и электрических характеристик подобных наноструктур.

В связи с поставленной задачей было необходимо изучить зависимости характеристик излучения из указанных наноструктур от величин пропускаемого тока исток-сток и напряжения, приложенного к внешним горизонтальным и вертикальным затворам.

### Кремниевая negative-U наносандвич-структура

Исследуемый в работе кремниевый наносандвич (КНС) представляет собой сверхузкую кремниевую квантовую яму  $p$ -типа ( $p$ -Si-QW), ограниченную дельта-барьерами (Si:B), сильно легированными бором, (концентрация бора  $N(B) = 5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ), полученную на поверхности монокристаллического кремния  $n$ -типа ( $n$ -Si (100)) (рис. 1,а). КНС выполнен в рамках холловской геометрии путем предварительного окисления кремния и дальнейшей краткосрочной диффузии бора из газовой фазы [2]. Было показано, что высокая концентрация бора внутри  $\delta$ -барьеров приводит к тому, что атомы бора внутри таких барьеров выстраиваются в кристаллографически ориентированные последовательности тригональных дипольных центров  $B^- + B^+$  с отрицательной корреляционной энергией, возникающих в результате реакции  $2B^0 \rightarrow B^- + B^+$  (negative-U реакция) [1, 2]. Двумерная плотность носителей в Si-QW составляет  $n_{2D} = 3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ . На модели показаны поперечный ( $V_{lg}$ ) и вертикальный ( $V_{ig}$ ) затворы, а также продольные измерительные контакты  $U_{xx}$  (см. рис. 1,а). Модель краёвого канала кремниевого наносандвича (рис. 1,б) демонстрирует одиночные носители тока (дырки), ограниченные кристаллографически ориентированными дипольными центрами. Тригональный дипольный центр бора (рис. 1,с) представляет собой виртуальный джозефсоновский переход со сверхпроводящей корреляционной щелью величиной  $2\Delta = 44 \text{ мэВ}$  (10,64 ТГц). Модель транспорта носителей в краевом канале (рис. 1,д) демонстрирует квазиодномерные последовательности дипольных центров бора, ограничивающие краевые каналы КНС, и два встречных джозефсоновских перехода на границе раздела между соседними носителями тока в канале.

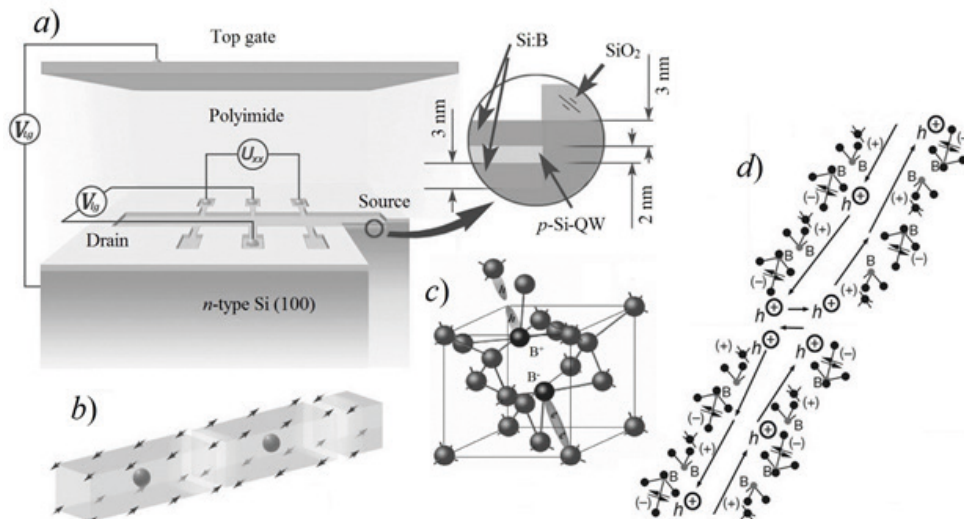


Рис. 1. Схематическое изображение модели рассматриваемой структуры  $p$ -Si-QW (а), ее элементов (б, с, вставка а) и транспорта носителей в краевом канале (д):

Si:B –  $\delta$ -барьеры, сильно легированные бором;  $n$ -Si (100) – поверхность кремния  $n$ -типа;  $V_{lg}$ ,  $V_{ig}$  – напряжения на поперечном и вертикальном затворах, соответственно;  $U_{xx}$  – напряжение на продольных измерительных контактах; б – модель краёвого канала кремниевого наносандвича (черные шарики – дырки), с – тригональный дипольный центр бора

Было обнаружено, что наличие тригональных дипольных центров бора вносит существенный вклад в подавление электрон-электронного взаимодействия между носителем тока и, как следствие, позволяет наблюдать макроскопические квантовые явления при высокой (вплоть до комнатной) температуре [1]. Более того, наиболее эффективное подавление электрон-электронного взаимодействия достигается внутри краевых каналов кремниевой квантовой ямы, ограниченных *negative-U* дипольными центрами. Следует отметить, что величина отрицательной корреляционной энергии определяется степенью компенсации электрон-электронного взаимодействия электрон-колебательным взаимодействием ввиду наличия локальной фононной моды [2]. Детальное изучение температурных зависимостей проводимости в условиях кристаллографической ориентации краевых каналов КНС позволило определить величину отрицательной корреляционной энергии (*negative-U*) в 0,044 эВ [2], указывающей на возможность наблюдения макроскопических квантовых явлений при высоких температурах.

В ходе процесса получения подобных квантоворазмерных *p-n*-переходов с помощью планарной кремниевой нанотехнологии можно сформировать систему фрактальных микрорезонаторов, встроенных в плоскость перехода. Система микрорезонаторов, настроенных на частоты, характерные для ИК-диапазона электромагнитных волн, позволяет усилить интенсивность их излучения. Кроме того, отработанная нанотехнология легирования бором, приводящая к формированию дельта-барьеров, ограничивающих сверхузкие кремниевые квантовые ямы, позволяет использовать данные структуры в качестве генераторов электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) и гигагерцового (ГГц) диапазонов [2]. Глубину ТГц-модуляции можно существенно увеличить, если варьировать распределение электрического поля в краевом канале в условиях приложения напряжения к горизонтальным и вертикальным контактам, выполняющим роль затворов (по аналогии с реализацией оптического транзистора).

Вследствие эффективного подавления электрон-электронного взаимодействия, дырки, находящиеся внутри краевых каналов, формируют цепочки квантовых гармонических осцилляторов, генерирующих ТГц- и ГГц- излучения в рамках квантового эффекта Фарадея при условии пропускания через краевые каналы КНС стабилизированного тока исток-сток, индуцирующего появление магнитного поля. В свою очередь, возникающие в этом процессе кванты магнитного потока  $h/e$  для одиночных дырок в нормальных цепочках дипольных центров и  $h/2e$  для сверхпроводящих цепочек, когда сегменты краевых каналов, называемые пикселями, объединяются, формируя пары дырок, «захватываются» на краевые каналы (см. рис. 1, *b*), создавая в результате квантового эффекта Фарадея индуцированный ток, приводящий к ТГц- и ГГц-генерации:

$$I_{ind} \cdot \Delta\Phi = E(h\nu),$$

где  $\Delta\Phi = \Phi_0 = h/e(h/2e)$ .

В зависимости от величины тока исток-сток возможны два механизма генерации ТГц-излучения [2].

Следует отметить, что под квантовым эффектом Фарадея мы подразумеваем квантовый аналог выражения, полученного Р. Б. Лафлином [3, 4] для описания квантового транспорта частиц во внешнем магнитном поле и не имеющего ничего общего с магнитооптическим эффектом Фарадея. Ключевыми особенностями представленного подхода выступают отсутствие внешнего магнитного поля, а также способность изменять энергию частиц не только за счет прикладываемой к горизонтальным затворам разности потенциалов, но и с помощью энергии квантов электромагнитного излучения. Другими словами, та версия выражения Лафлина, которой мы следуем в данной работе, есть квантовый аналог закона электромагнитной индукции для случая, когда изменение магнитного потока, индуцированного за счет пропускания тока, соответствует конкретному числу квантов магнитного потока, захватываемого на площадь исследуемой кремниевой *negative-U* наноструктуры [1].

При малых токах (менее  $9 \cdot 10^{-7}$  А) механизм, описанный выше и связанный с генерацией индуцированного тока  $I_{ind}$  (в пикселях) в процессе захвата одиночных квантов магнитного потока, является доминирующим. Для величин токов, значительно превышающих указанное значение, генерация ТГц-излучения происходит аналогично таковой в системе,



обладающей двумя встречными джозефсоновскими переходами (рис. 1, *d*). В таком случае частота генерации определяется известным выражением:

$$h\nu = neI_{ind}R_0,$$

где  $R_0$  – квант сопротивления для одиночной дырки (либо пары дырок); для одиночной ( $n = 1$ )  $R_0 = h / e^2$ , тогда как для пары дырок в сверхпроводящих цепочках дипольных центров ( $n = 2$ )  $R_0 = h / 4e^2$ .

Если учесть величину двумерной плотности носителей тока в квантовой яме КНС,  $n_{2D} = 3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ , размеры пикселя с одиночной дыркой будут равны 16,6 мкм и 2,0 нм в продольном и поперечном направлениях соответственно, что, в свою очередь, приводит к преобладанию генерации излучения на частоте 2,8 ТГц [2].

### Возможность фазового контроля ТГц-модулированной электролюминесценции

Наличие постоянного внешнего напряжения на  $p$ - $n$ -переходе приводит к спин-орбитальному расщеплению энергии носителей в краевых каналах в присутствии тока исток-сток [2]. Топологические и сверхпроводящие свойства краевых каналов КНС были подтверждены путем наблюдения и результатами исследования многочисленных макроскопических квантовых эффектов, среди которых дробная квантовая лестница проводимости дырок в краевых каналах, квантовый эффект Холла (в том числе и квантовый спиновый эффект Холла), осцилляции Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена [1], а также многократное андреевское отражение [1] соответственно. Более того, подавление электрон-электронного взаимодействия между носителями тока в краевых каналах вследствие  $\text{negative-U}$  реакции обеспечивает эффект охлаждения, который проявляется в виде зависимости величины красного смещения излучения от пропускаемого тока [1] как результат сильного обменного взаимодействия носителей с дипольными центрами бора с отрицательной корреляционной энергией. Именно наличие данного эффекта позволило наблюдать ТГц-электролюминесценцию при высокой температуре (вплоть до комнатной).

Для измерения модулированной электролюминесценции при комнатной температуре ( $T = 300 \text{ К}$ ) использовали спектрометр Bruker IFS 115 (рис. 2 и 3).

Модулированный спектр электролюминесценции, демонстрирующий возможность контроля фазы, оказывается зависящим как от пропускаемого тока (рис. 3), так и от напряжений на вертикальном ( $V_{ig}$ ) (рис. 2,  $e - g$ ) и на горизонтальном ( $V_{ig}$ ) (рис. 2,  $a - c$ ) поперечных затворах. Причина возникновения представленных спектров ТГц-излучения связана с наличием внутри краевого канала двух встречных джозефсоновских переходов (нестационарный эффект Джозефсона), которые формируются на границах соседних пикселей, содержащих одиночные дырки (см. рис. 1, *d*). Указанные переходы описываются в рамках квантового эффекта Фарадея при условии подавления процессов диссипации; эти процессы подавляются вследствие сильной компенсации электрон-электронного взаимодействия. До тех пор пока величина стабилизированного тока исток-сток  $I_{ds}$  остается меньше некоторой критической величины  $I_{cr} \approx e / \tau$ , где  $\tau$  – это время фазовой релаксации каждого одиночного носителя, электрон-электронное взаимодействие оказывается существенно подавленным. Однако когда  $I_{ds} > I_{cr}$  и реализуется так называемый сверхкритический токовый режим, в оптическом спектре наблюдается ТГц-электролюминесценция, зависящая от величины тока.

Вследствие симметрии краевых каналов относительно вертикального и поперечного затворов, наличие напряжения на любом из них выполняет (в силу уже упомянутого квантового эффекта Фарадея) функцию компенсирующего механизма, аналогичного напряжению, приложенному к виртуальному нестационарному джозефсоновскому переходу. Наличие контролируемого напряжения на подобном двойном встречном джозефсоновском переходе, представляющим собой дипольный центр бора с отрицательной корреляционной энергией величиной  $2\Delta = 44 \text{ мэВ}$  [2] и соответствующей частотой 10,64 ТГц, позволяет осуществлять фазовый контроль спектральных характеристик ТГц-излучения.

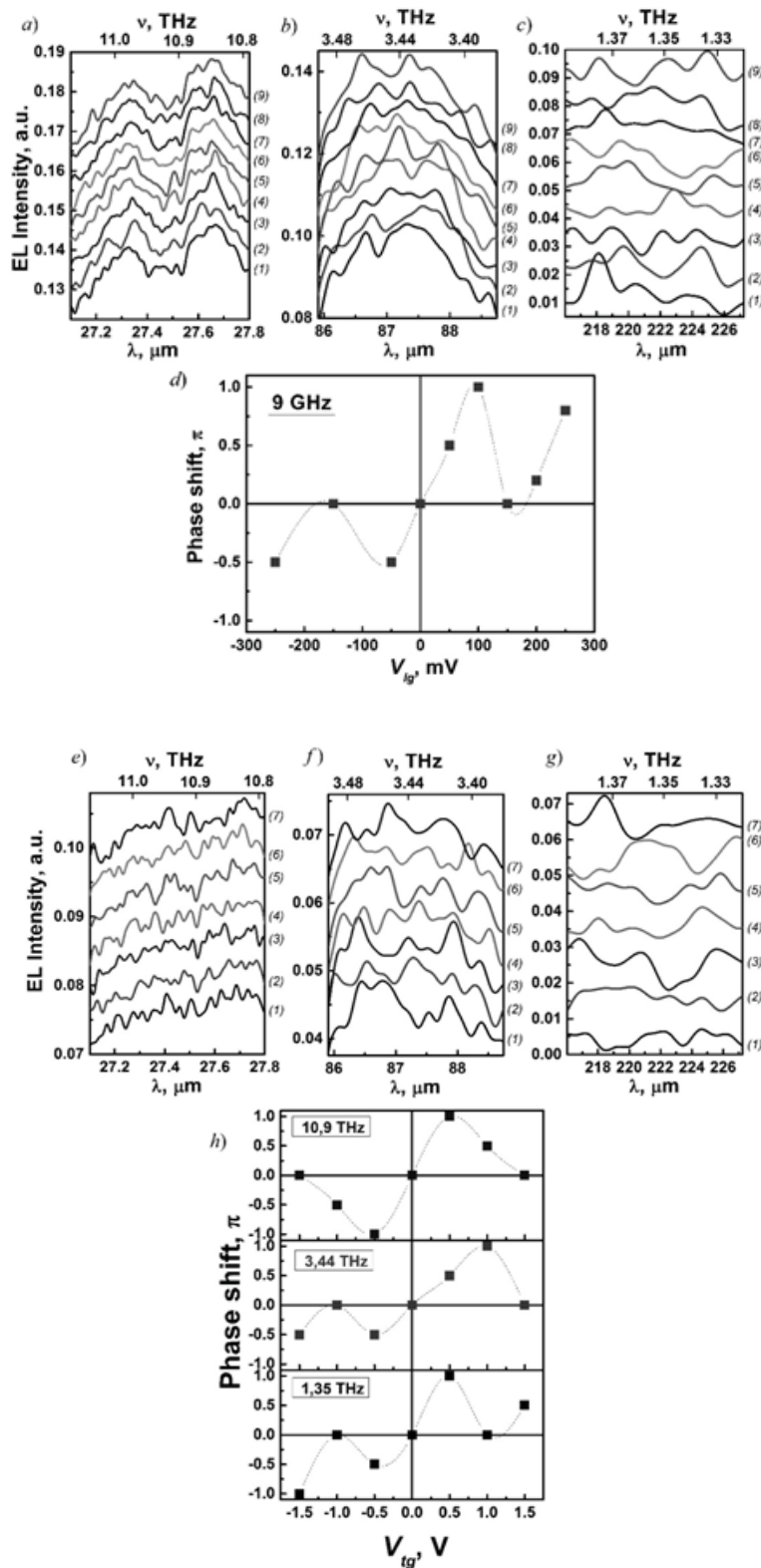


Рис. 2. Спектры модулированной ТГц-электролюминесценции на трех частотных диапазонах для различных напряжений поперечного ( $V_{lg}$ ,  $a - c$ ) и вертикального ( $V_{lg}$ ,  $e - g$ ) затворов, а также зависимости фазового сдвига от этих напряжений  $V_{lg}$  ( $d$ ) и  $V_{lg}$  ( $h$ ).  $T = 300$  К.

$V_{lg}$ , мВ: -250 (1), -150 (2), -50 (3), 0 (4), 50 (5), 100 (6), 150 (7), 200 (8), 250 (9) ( $a - c$ );

$V_{lg}$ , В: -1,5 (10), -1,0 (11), -0,5 (12), 0,0 (13), 0,5 (14), 1,0 (15), 1,49 (16).  
 Частота модуляции, ТГц:  $9 \cdot 10^{-3}$  ( $a - d$ ), 1,35 ( $e, h$ ), 3,44 ( $f, h$ ) и 10,9 ( $g, h$ )

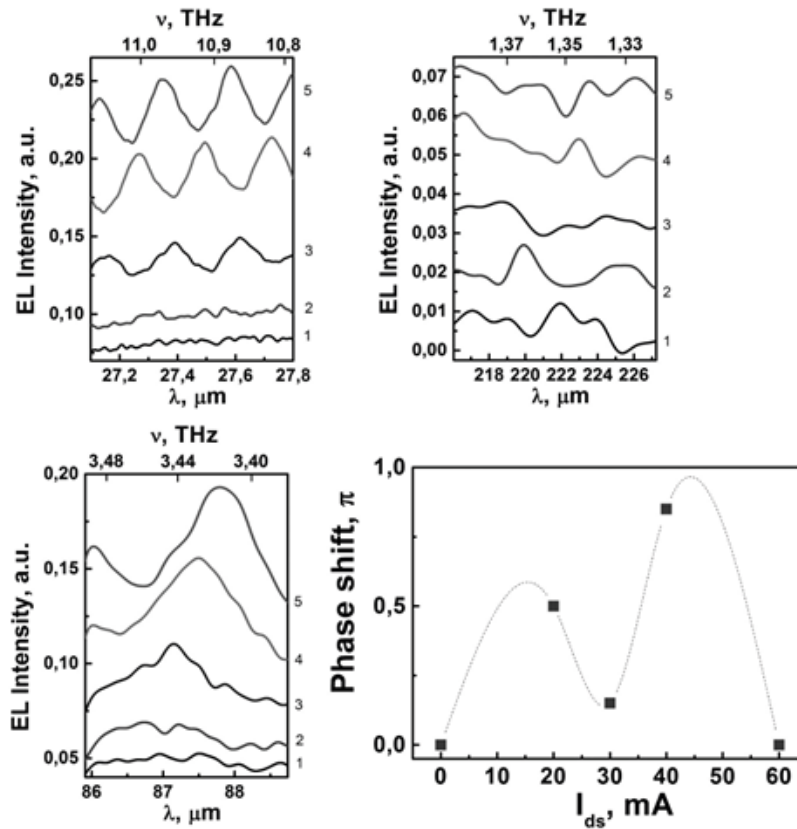


Рис. 3. Спектры модулированной ТГц-электролюминесценции на трех частотных диапазонах для различных значений тока исток-сток  $I_{ds}$  (a – c), а также зависимость фазового сдвига от этого тока (d).  $T = 300$  К.  $I_{ds}$ , мА: 0 (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4) и 60 (5).

Частота модуляции – 10,9 ТГц

### Дробное квантование проводимости

Электрические характеристики КНС взаимосвязаны с представленными выше оптическими спектрами. Вольтамперные характеристики краевых каналов кремниевых наносандвич-структур демонстрируют дробное квантование продольной проводимости. Последнее зависит как от величины пропускаемого стабилизированного тока исток-ток в качестве квантующего параметра, так и от напряжения поперечного затвора (в качестве управляющего параметра), приложенного к холловским контактам (рис. 4).

Существенное уменьшение эффективной массы носителей тока [1] до величины  $m^* \approx 2 \cdot 10^{-5} m_e$  в совокупности с подавлением электрон-электронного взаимодействия между ними в краевых каналах, в докритическом токовом режиме  $I_{ds} < I_{cr}$  ( $I_{cr}$  – величина критического тока), обеспечивает спинозависимый диамагнитный отклик магнитной восприимчивости (рис. 5) в зависимости от величины внешнего магнитного поля [1]. Таким образом, магнитное поле, индуцированное путем пропускания тока исток-сток через систему невзаимодействующих носителей, приводит, в свою очередь, к генерации диамагнитного или, иными словами, индуцированного тока  $I_{ind}$ , который не участвует в переносе заряда, но при наличии напряжения на поперечном затворе способен, благодаря квантовому эффекту Фарадея, влиять на величину продольной проводимости. В итоге существенное подавление электрон-электронного взаимодействия влечет за собой процесс формирования композитных частиц за счет захвата одиночных квантов магнитного потока в систему невзаимодействующих носителей тока в краевых каналах.

Такой процесс описывается с помощью модели Лафлина [1, 3 – 5]:

$$I_{ind} = e V_{ig} / \Delta \Phi_V,$$

где  $\Delta\Phi_V$  – так называемая гейт-фаза, соответствующая количеству захваченных квантов магнитного потока,  $\Delta\Phi_V = eV_{lg} / I_{ind}$

Изменяя величину напряжения на поперечном холловском затворе, можно осуществлять фазовый контроль величины продольной проводимости (см. рис. 4):

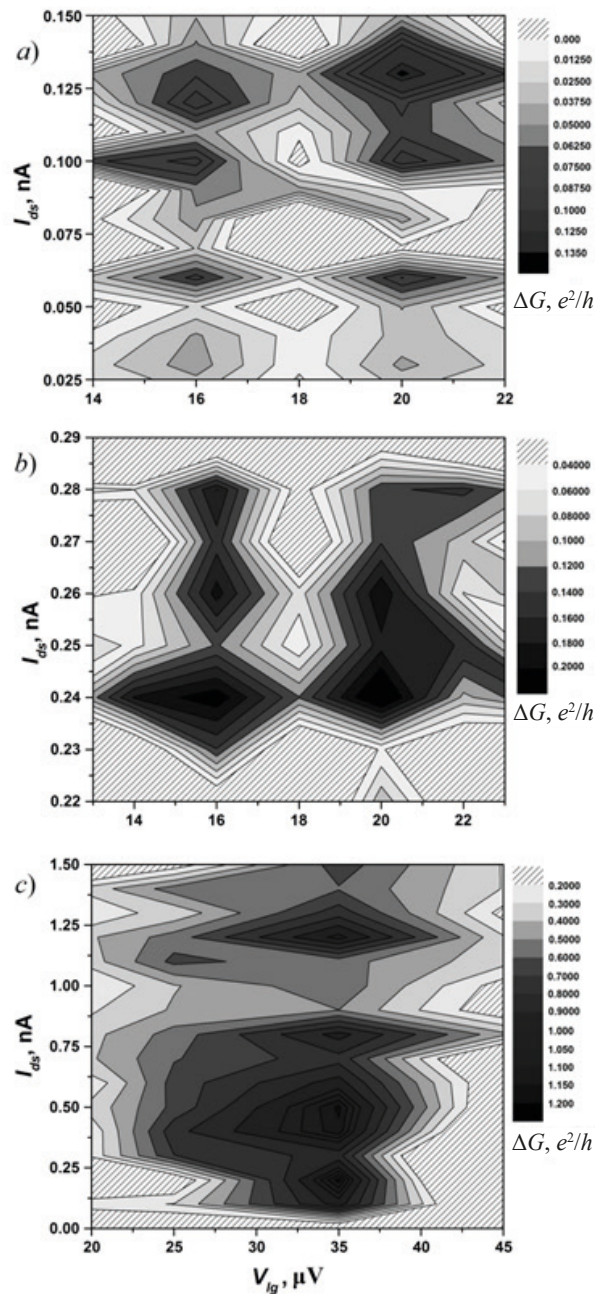


Рис. 4. Дробная квантованная продольная проводимость краевых каналов кремниевых наносандвичей. Изображения *a)*, *b)* и *c)* соответствуют различным шагам в развертке пропускаемого тока и напряжения на поперечном затворе;  $T = 300$  К.

Фазовый сдвиг определяется количеством захваченных квантов магнитного потока  $\Delta\Phi_V$  и  $\Delta\Phi_V$  в область краевого канала



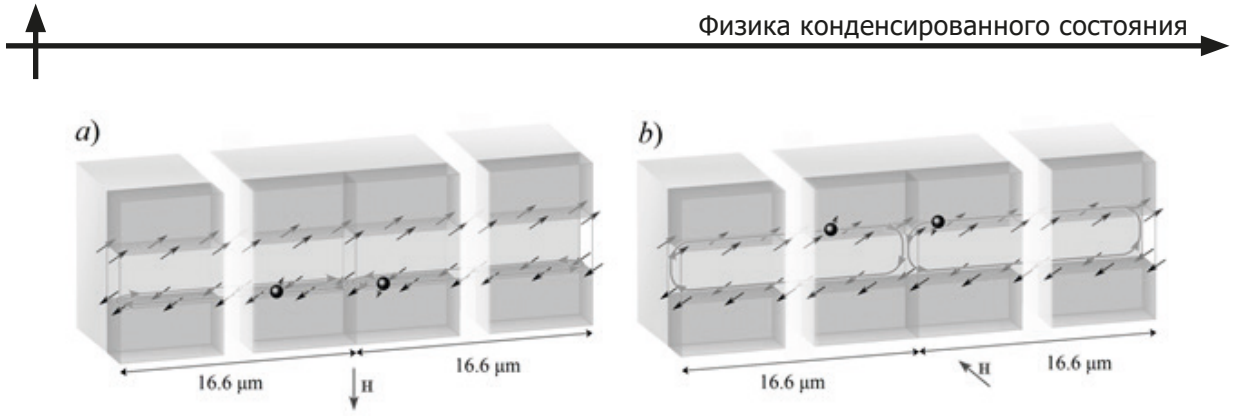


Рис. 5. Модель транспорта носителей тока в краевых каналах в присутствии вертикального (a) и горизонтального (b) внешних магнитных полей

$$\Delta G = \Delta G_0(I_{ds}) \cdot \cos^2 \left( \pi \frac{\Delta \Phi_I}{\Phi_0} + \varphi_I \right) \cos^2 \left( \pi \frac{\Delta \Phi_V}{\Phi_0} + \varphi_V \right). \quad (1)$$

Здесь  $\Delta \Phi_I$  – токовая фаза, определяющая количество захваченных квантов магнитного потока вследствие явления самоиндукции, описываемого известным законом  $\Delta \Phi_I = L \cdot I_{ds}$ ;  $L$ , Гн, – индуктивность краевого канала.

Индуктивность сложным образом зависит от величины тока исток-сток:  $L(I_{ds})$ . Изучение и анализ этой зависимости требуют отдельных исследований и выходят за рамки данной статьи. Однако порядок величины индуктивности можно оценить на основе представленного эксперимента, а также через измерения полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости [1]; она составляет  $(0,80 - 0,95) \cdot 10^{-4}$  Гн.

Различие в значениях генерируемого (индуцированного) тока  $I_{ds}$  в диапазоне от 0,155 нА (см. рис. 4, a, b) до 1,356 нА (см. рис. 4, c) можно объяснить масштабируемостью представленных «карт» проводимости кремниевой negative-U наносандвич-структуры (см. рис. 4).

Следует также отметить, что геометрия эксперимента как при получении зависимостей оптических спектров от величин токов и напряжений затворов, так и при измерениях продольной проводимости, была идентичной. Единственное различие заключалось в экспериментах с нестационарным эффектом Джозефсона и стационарным. Фазовые сдвиги в оптических и электрических измерениях имеют по сути одинаковую природу и могут быть интерпретированы как проявление квантового эффекта Фарадея. Последний состоит в захвате одиночных квантов магнитного потока на краевой канал кремниевого negative-U наносандвича, причем процесс имеет место при комнатной температуре.

### Заключение

Представленные спектры демонстрируют ТГц-модулированную электролюминесценцию, зависящую от тока исток-сток и напряжений на поперечном и вертикальном затворах, и возможность ее фазового контроля. Соответствие спектральных характеристик электролюминесценции и фазовых характеристик продольной проводимости краевых каналов кремниевого квантового наносандвича указывает на правомерность их совместного описания с использованием квантового эффекта Фарадея.

Таким образом, фазовые инверторы и оптические модуляторы, а также портативные и настраиваемые источники и приемники терагерцового излучения на базе кремниевых наносандвичей с такими контролируемыми параметрами, как частота, амплитуда и фаза, перспективны для создания базовых приборов терагерцовой кремниевой радиофотоники.

### Благодарности

Авторы Н. И. Руль и П. А. Головин благодарят за поддержку исследований Фонд содействия инновациям УМНИК-20: «Разработка ТГц-излучателя для терапии нейродегенеративных заболеваний», № 0067237; Фонд содействия инновациям УМНИК-19: «Разработка спиновых кремниевых транзисторов для квантовых вычислений при комнатной температуре», № 0059806.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bagraev N. T., Grigoryev V. Yu., Klyachkin L. E., Malyarenko A. M., Mashkov V. A., Romanov V. V., Rul' N. I. High-temperature quantum kinetic effect in silicon nanosandwiches // *Low Temperature Physics*. 2017. Vol. 43. No. 1. Pp. 110–119.
2. Bagraev N. T., Golovin P. A., Khromov V. S., Klyachkin L. E., Malyarenko A. M., Mashkov V. A., Novikov B. A., Presnukhina A. P., Reukov A. S., Taranets K. B. Terahertz emitters based on negative-U materials for medical applications // *Materials Physics and Mechanics*. 2020. Vol. 44. No. 2. Pp. 264–270.
3. Laughlin R. B. Quantized Hall conductivity in two dimensions // *Physical Review B*. 1981. Vol. 23. No. 10. Pp. 5632–5633.
4. Laughlin R. B. Anomalous quantum Hall effect: An incompressible quantum fluid with fractionally charged excitations // *Physical Review B*. 1983. Vol. 50. No. 18. Pp. 1395–1398.
5. Halperin B. I. Theory of the quantized Hall conductance // *Helvetica Physica Acta*. 1983. Vol. 56. No. 1–3. Pp. 75–102.
6. Melentev G. A., Shalygin V. A., Vorobjev L. E., et al. Interaction of surface plasmon polaritons in heavily doped GaN microstructures with terahertz radiation // *Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 119. No. 9. P. 093104.
7. Васильев Ю. В., Михайлов Н. Н., Васильева Г. Ю. и др. Терагерцовое излучение из квантовых ям CdHgTe/HgTe с инвертированной структурой зон // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50. № 7. С. 932–936.
8. Galimov A. I., Shalygin V. A., Moldavskaya M. D., et al. Optical properties of GaN/AlGaIn nanostructures in the terahertz frequency range // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 816. No. 1. P. 012019.
9. Makhov I. S., Panevin V. Yu., Firsov D. A., Vorobjev L. E., Sofronov A. N., Vinnichenko M. Ya., Maleev N. A., Vasil'ev A. P. Impurity-assisted terahertz photoluminescence in quantum wells under conditions of interband stimulated emission // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 993. No. 1. P. 012017.
10. Shalygin V. A., Moldavskaya M. D., Panevin V. Yu., et al. Interaction of surface plasmon-phonon polaritons with terahertz radiation in heavily doped GaAs epilayers // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2018. Vol. 31. No. 10. P. 105002.
11. Gorbenko I. V., Kachorovsky V. Yu., Shur M. S. Plasmonic polarization-sensitive detector of terahertz radiation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1236. No. 1. P. 012029.

## REFERENCES

1. Bagraev N. T., Grigoryev V. Yu., Klyachkin L. E., et al., High-temperature quantum kinetic effect in silicon nanosandwiches, *Low Temperature Physics*. 43 (1) (2017) 110–119.
2. Bagraev N. T., Golovin P. A., Khromov V. S., et al., Terahertz emitters based on negative-U materials for medical applications, *Materials Physics and Mechanics*. 44 (2) (2020) 264–270.
3. Laughlin R. B., Quantized Hall conductivity in two dimensions, *Phys. Rev. B*. 23 (10) (1981) 5632–5633.
4. Laughlin R. B., Anomalous quantum Hall effect: An incompressible quantum fluid with fractionally charged excitations, *Phys. Rev. B*. 50 (18) (1983) 1395–1398.
5. Halperin B. I., Theory of the quantized Hall conductance, *Helv. Phys. Acta*. 56 (1–3) (1983) 75–102.
6. Melentev G. A., Shalygin V. A., Vorobjev L. E., et al., Interaction of surface plasmon polaritons in heavily doped GaN microstructures with terahertz radiation, *J. Appl. Phys.* 119 (9) (2016) 093104.
7. Vasilyev Yu. B., Mikhailov N. N., Vasilyeva G. Yu., et al., Terahertz emission from CdHgTe/HgTe quantum wells with an inverted band structure, *Semiconductors*. 50 (7) (2016) 915–919.
8. Galimov A. I., Shalygin V. A., Moldavskaya M. D., et al., Optical properties of GaN/AlGaIn nanostructures in the terahertz frequency range, *J. Phys. Conf. Ser.* 816 (1) (2017) 012019.
9. Makhov I. S., Panevin V. Yu., Firsov D. A., et al., Impurity-assisted terahertz photoluminescence in quantum wells under conditions of interband stimulated emission, *J. Phys. Conf. Ser.* 993 (1) (2018) 012017.
10. Shalygin V. A., Moldavskaya M. D., Panevin V. Yu., et al., Interaction of surface plasmon-



phonon polaritons with terahertz radiation in heavily doped GaAs epilayers, *J. Phys. Condens. Matter.* 31 (10) (2018) 105002.

11. **Gorbenko I. V., Kachorovsky V. Yu., Shur M. S.**, Plasmonic polarization-sensitive detector of terahertz radiation, *J. Phys. Conf. Ser.* 1236 (1) (2019) 012029.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**РУЛЬ Николай Игоревич** – ассистент кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, младший научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

rul.nickolai@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8991-6784

**ГОЛОВИН Павел Александрович** – аспирант кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, младший научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

yellowcat0101@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2876-2333

**БАГРАЕВ Николай Таймуразович** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

bagraev@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0001-8286-3472

**КЛЯЧКИН Леонид Ефимович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

klyachkin@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0001-7577-1262

**МАЛЯРЕНКО Анна Михайловна** – научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

annamalyarenko@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4667-7004

### THE AUTHORS

#### **RUL' Nikolai I.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

rul.nickolai@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8991-6784

#### **GOLOVIN Pavel A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

yellowcat0101@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2876-2333

**BAGRAEV Nikolay T.**

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia  
bagraev@mail.ioffe.ru  
ORCID: 0000-0001-8286-3472*

**KLYACHKIN Leonid E.**

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences  
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia  
klyachkin@mail.ioffe.ru  
ORCID: 0000-0001-7577-1262*

**MALYARENKO Anna M.**

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences  
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia  
annamalyarenko@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-4667-7004*

*Статья поступила в редакцию 16.11.2021. Одобрена после рецензирования 22.11.2021.  
Принята 22.11.2021.*

*Received 16.11.2021. Approved after reviewing 22.11.2021. Accepted 22.11.2021.*