

07

Терагерцовое излучение при примесном пробое в Si(Li)

© А.В. Андрианов^{1¶}, А.О. Захарьин¹, Р.Х. Жукавин²,
В.Н. Шастин^{2,3}, Д.В. Шенгуров², Н.В. Абросимов⁴

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт физики микроструктур, Афонино, Нижегородская область, Россия

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁴ Leibniz Institute for Crystal Growth, 12489 Berlin, Germany

¶E-mail: alex.andrianov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 мая 2016 г.

Представлены результаты исследования терагерцовой электролюминесценции, вызванной примесным пробоем в кристаллах кремния, легированных литием. В спектре терагерцового излучения видны линии внутрицентровых переходов электронов между возбужденными примесными состояниями и подуровнями основного состояния донора лития. В спектре присутствует также фон, который, по-видимому, обусловлен проявлением эффектов разогрева при электрическом возбуждении.

В последние два десятка лет непрерывно возрастает интерес к электромагнитным волнам терагерцового (THz) диапазона (с частотами 0.1–10 THz), что обусловлено перспективами применения THz-систем в целом ряде областей науки и технологии [1]. Интенсивные исследования проводятся в области создания источников THz-излучения, основанных на самых различных принципах [1]. Один из возможных вариантов относительно простого эмиттера THz-излучения может быть реализован с использованием оптических переходов между уровнями мелких примесей в полупроводниках. Внутрицентровые THz-излучательные переходы возникают при энергетической релаксации неравновесных носителей заряда, созданных в разрешенной зоне, например, при ударной ионизации примесей в электрическом поле [2–4] или в результате фотоионизации примесей излучением CO₂-лазера [5]. Внутрицентровые

оптические переходы могут быть возбуждены также при межзонном фотовозбуждении материала, легированного мелкими примесями [6]. Важно отметить, что на внутрицентровых оптических переходах в германии и кремнии была продемонстрирована THz-лазерная генерация [4,5]. Эмиттеры THz-излучения на кремнии интересны тем, что допускают прямую интеграцию с кремниевой электроникой.

Литий в кремнии, имеющий малый ионный радиус, чрезвычайно высокий коэффициент диффузии и образующий междоузельный донор, обладает целым рядом необычных в сравнении с другими донорными примесями свойств [7]. Энергия ионизации донора лития в кремнии значительно меньше, чем у других доноров, образованных, например, элементами V группы [7]. Необычной оказывается и электронная структура основного состояния донора лития. Имеет место „инвертированное“ в сравнении с донорами V группы расположение подуровней основного состояния донора [8]. Структура основного состояния донора лития в кремнии может оказаться удобной для реализации кубита в схеме квантового компьютера со способом считывания информации, использующим внутрицентровые оптические переходы [9]. Недавно нами была обнаружена интенсивная THz-фотолюминесценция (ФЛ) в кремнии с литием при стационарном межзонном фотовозбуждении [10]. Квантовая эффективность такой THz ФЛ достигает порядка 10^{-4} . Основная THz ФЛ в Si(Li) обусловлена внутрицентровыми переходами электронов из возбужденных состояний донора лития в основное примесное состояние.

Представляет самостоятельный интерес также исследование THz-излучения, вызванного электрическим пробоем примесных центров в кремнии с литием, и в настоящей работе приводятся результаты такого исследования.

Эксперименты по THz-электролюминесценции (ЭЛ) были проведены на монокристаллах кремния, легированных литием до уровня $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в процессе роста из расплава методом выращивания с пьедестала (вариант бестигельной зонной плавки) [11]. Согласно контрольным измерениям оптического поглощения в среднем ИК-диапазоне, концентрация кислорода в полученных кристаллах была ниже 10^{16} см^{-3} . Образцы для измерений были приготовлены в форме прямоугольных параллелепипедов размером $2.9 \times 3.1 \times 1.1 \text{ mm}$. На верхнюю грань размером $2.9 \times 3.1 \text{ mm}$ был нанесен омический контакт в форме диска диаметром 1 mm. Второй омический контакт был нанесен

на всю поверхность нижней грани. Омические контакты создавались последовательным напылением слоев титана и золота (толщинами 40 и 300 nm соответственно) без дополнительного нагрева. Исследуемые образцы укреплялись на хладопроводе гелиевого оптического криостата, оптимизированного для THz-области спектра. Температура на хладопроводе криостата контролировалась калиброванным германиевым термометром-сопротивлением, укрепленным в непосредственной близости к исследуемому образцу. На образцы подавалось смещение в виде последовательностей прямоугольных импульсов, следующих с частотой 75 Hz и содержащих по 66 импульсов с длительностью 25 μ s и интервалом между импульсами 75 μ s. Такое смещение было выбрано для минимизации влияния разогрева образцов на результаты измерений. Спектры THz-излучения измерялись с помощью специализированного step-scan фурье-спектрометра, описанного в деталях в [12]. Излучение измерялось охлаждаемым жидким гелием Si болометром и lock-in усилителем, синхронизируемым на частоте следования пачек импульсов напряжения смещения (75 Hz).

На рис. 1 показана характерная зависимость амплитуды импульсного тока от амплитуды импульса напряжения (ВАХ) для образца Si(Li), возбуждаемого упомянутыми выше пачками прямоугольных импульсов. Температура на хладопроводе криостата в процессе измерений была в интервале 6.4–7.0 K. На этом же рисунке показана зависимость сигнала THz-излучения от амплитуды импульса напряжения смещения. Видно, что резкий рост тока и интенсивности THz-излучения происходит при амплитуде импульса напряжения смещения выше 10 V, что обусловлено электрическим пробоем доноров лития. Важно отметить, что в пост-пробойном режиме интенсивность THz-излучения растет практически линейно с ростом тока (см. вставку в рис. 1). Оценка порогового поля пробоя донора Li в условиях данного эксперимента в пренебрежении неоднородностью электрического поля в исследуемом образце, которая, безусловно, имеет место вследствие разной геометрии верхнего и нижнего контактов, дает величину порядка 91 V/cm. THz ЭЛ измерялась при наблюдении как с верхней грани, так и с боковой. При этом интенсивность ЭЛ с верхней грани была выше примерно в 1.5 раза, что мы связываем с неоднородной по объему образца плотностью тока, а также с различием в площадях излучающих поверхностей.

На рис. 2. показан спектр THz ЭЛ в Si(Li) при напряжении смещения вблизи порога примесного пробоя (при 11.2 V или поле

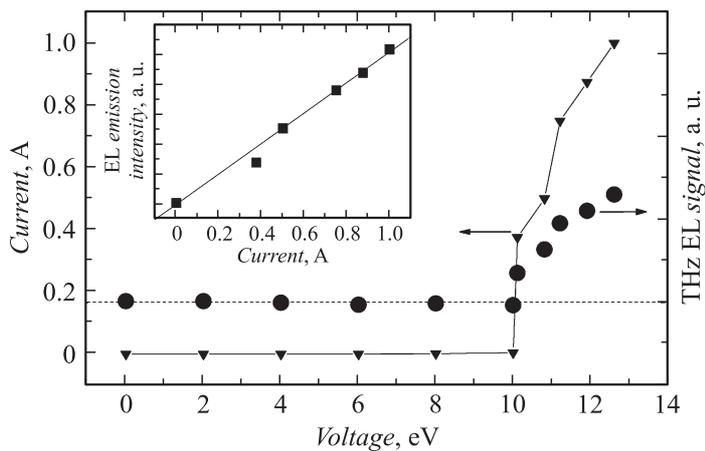


Рис. 1. Импульсная ВАХ образца Si(Li) в интервале температур 6.4–7.0 К. Зависимость интенсивности ТГц-электролюминесценции от амплитуды импульса напряжения смещения. Пунктирная линия соответствует уровню нулевого ТГц-сигнала. На вставке показана зависимость интенсивности ТГц ЭЛ от амплитуды импульсного тока в постпробойном режиме. Прямая сплошная линия — аппроксимация данных линейной функцией.

порядка 102 V/cm). Для сравнения на этом рисунке приведен также спектр ТГц ФЛ в условиях межзонного фотовозбуждения Si(Li) [10]. В спектре ТГц ЭЛ виден плавно нарастающий с частотой фон, на который накладываются сравнительно узкие линии излучения. Спектральное положение этих линий позволяет отнести их к внутрицентровым переходам в донорах лития. Ряд таких линий виден также и в спектре ТГц ФЛ (рис. 2), но соотношение интенсивностей линий в спектрах ЭЛ и ФЛ заметно отличается, что, возможно, обусловлено разными механизмами возбуждения внутрицентровых переходов. Фон, наблюдаемый в спектре ТГц ЭЛ, вероятно, связан с проявлением эффектов разогрева при электрическом возбуждении. Интенсивные линии с максимумами при 24.7 и 21.7 meV в спектре ТГц ЭЛ хорошо согласуются с энергиями переходов $2P_{\pm} \rightarrow 1S(A_1)$ и $2P_0 \rightarrow 1S(E + T_2)$ соответственно, между возбужденными состояниями и подуровнями основного состояния донора лития [8]. Более слабые особенности в

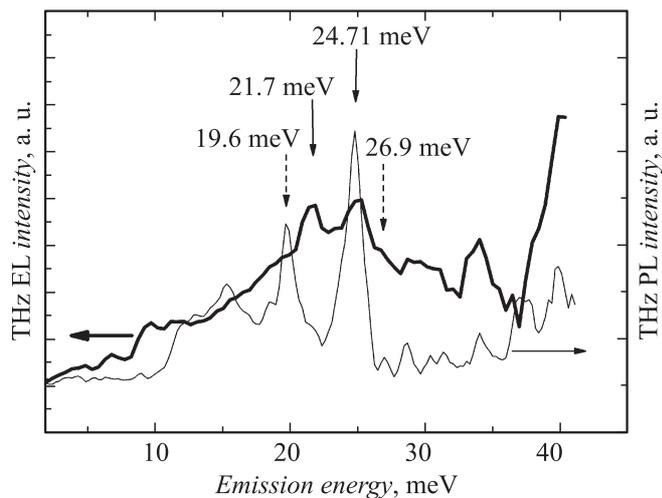


Рис. 2. Спектр THz-электролюминесценции Si(Li) в условиях вблизи порога пробоя примеси. $U = 11.2$ В, $T = 6.7$ К. Спектральное разрешение 8 cm^{-1} (0.99 meV). Приведен также спектр THz ФЛ при межзонном фотовозбуждении Si(Li) [10] (тонкая кривая). Вертикальные стрелки указывают энергии максимумов линий излучения, обсуждаемых в тексте. Спектры скорректированы с учетом спектральной зависимости чувствительности измерительной системы.

спектре THz ЭЛ при энергиях 26.9 и 19.6 meV могут быть отнесены к оптическим переходам $2P_{\pm} \rightarrow 1S(E + T_2)$ и $2P_0 \rightarrow 1S(A_1)$ соответственно, в хорошем согласии с данными по примесному поглощению в Si(Li) [8]. В спектре THz ЭЛ видны также особенности при энергиях 28.5, 30.9 и 33.9 meV, наблюдающиеся и в спектре THz ФЛ (рис. 2) и, скорее всего, связанные с внутрицентровыми оптическими переходами в донорах, обусловленных комплексами Li–O [10].

Таким образом, в настоящей работе обнаружена и исследована THz-электролюминесценция, вызванная пробоем доноров в кремнии, легированном литием при гелиевых температурах. Напряженность порогового поля пробоя доноров лития при температуре 6.4 К составляет величину порядка 91 V/cm . В спектре THz-излучения вблизи порога пробоя донора преобладают линии оптических переходов из возбужденных $2P_{\pm}$ - и $2P_0$ -состояний донора лития на подуровни основного

состояния донора. В целом спектр THz ЭЛ согласуется со спектром ранее обнаруженной THz ФЛ [10] при межзонном фотовозбуждении Si(Li), но в спектре электролюминесценции присутствует плавный фон, который, по-видимому, связан с проявлением эффектов разогрева при электрическом возбуждении.

Авторы А.В. Андрианов, А.О. Захарьин выражают благодарность РФФИ (проект № 14-02-0012), а также ряду специальных программ РАН, при частичной поддержке которых была выполнена настоящая работа. Авторы В.Н. Шастин, Р.Х. Жукавин выражают благодарность РФФИ (проект № 14-02-00638), В.Н. Шастин, Р.Х. Жукавин и Н.В. Абросимов выражают также благодарность за поддержку настоящей работы совместному российско-немецкому проекту (InTerFEL project, BMBF No. 05K2014 and Russian Ministry of Science and Education ID No. RFMEFI61614X0008).

Список литературы

- [1] *Hangyo M.* // Jap. J. Appl. Phys. 2015. V. 54. P. 120 101-16.
- [2] *Lv P.-C., Troeger R.T., Adam T.N.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. N 1. P. 22–24.
- [3] *Андрианов А.В., Захарьин А.О., Ясиевич И.Н., Зиновьев Н.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. В. 8. С. 448–451.
- [4] *Gousev Yu.P., Altukhov I.V., Korolev K.A.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. N 9. P. 757–759.
- [5] *Pavlov S.G., Zhukavin R.Kh., Shastin V.N.* et al. // Phys. Status Solidi. B. 2013. V. 250. N 1. P. 9–36.
- [6] *Zakhar'in A.O., Andrianov A.V., Egorov A.Yu., Zinov'ev N.N.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. N 21. P. 211 118-3.
- [7] *Wolf H.F.* // Silicon Semiconductor Data. New York, Pergamon Press, 1969. Chap. III.
- [8] *Jagannath C., Grabowski Z.W., Ramdas A.K.* // Phys. Rev. B. 1981. V. 23. N 5. P. 2082–2098.
- [9] *Smelyanskiy V.N., Petukhov A.G., Osipov V.V.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 081 304-4 (R).
- [10] *Андрианов А.В., Захарьин А.О., Жукавин Р.Х.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. В. 12. С. 876–880.
- [11] *Riemann H., Abrosimov N.V., Notzel N.* // ECS Transactions. 2006. V. 3. N 4. P. 53–59.
- [12] *Зиновьев Н.Н., Андрианов А.В., Некрасов В.Ю.* // ФТП. 2002. Т. 36. В. 2. С. 234–237.