

## Инжекционная терагерцовая электролюминесценция кремниевых $p-n$ -структур

© А.О. Захарьин<sup>1</sup>, Ю.Б. Васильев<sup>1</sup>, Н.А. Соболев<sup>1</sup>, В.В. Забродский<sup>1</sup>, С.В. Егоров<sup>2</sup>, А.В. Андрианов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный горный университет, 199006 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: alex.andrianov@mail.ioffe.ru

(Получена 17 октября 2016 г. Принята к печати 24 октября 2016 г.)

В кремниевых  $p^+-n$ -структурах обнаружена инжекционная электролюминесценция в терагерцовом диапазоне при гелиевых температурах. Исследовались структуры, созданные диффузией бора в легированный фосфором  $n$ -кремний. В спектрах терагерцового излучения на фоне широкого плавного фона наблюдаются сравнительно узкие линии люминесценции. Спектральное положение ряда линий соответствует оптическим переходам в донорах фосфора. Внутрицентровые переходы электронов в донорах фосфора возбуждаются в результате рекомбинационных процессов, происходящих в  $n$ -области структуры при инжекции неравновесных дырок. Ряд других линий в спектрах терагерцового излучения связан с внутрицентровыми переходами в акцепторных центрах, которые также возбуждаются в результате инжекции. Бесструктурный фон в спектрах электролюминесценции может быть связан с излучением при внутризонной энергетической релаксации „горячих“ носителей заряда, с эффективной температурой, превышающей температуру решетки, которые появляются в структуре в условиях инжекции.

DOI: 10.21883/FTP.2017.05.44420.8432

### 1. Введение

В последние два десятилетия непрерывно возрастает интерес к электромагнитному излучению терагерцового диапазона (частоты от 0.1 до 10 ТГц). Такой интерес обусловлен перспективами применения терагерцовых (ТГц) диагностических и измерительных систем в различных областях науки и техники, включая аналитическую химию, биологию и медицину, технику дистанционного контроля, системы безопасности и экологического мониторинга окружающей среды [1–3]. Для практических применений требуются источники ТГц излучения различных типов, и в этом направлении ведутся интенсивные исследования. К настоящему времени в этих исследованиях достигнут значительный прогресс — реализованы полупроводниковые ТГц квантово-каскадные лазеры (ККЛ) с электрическим возбуждением [4,5]. Тем не менее ТГц квантово-каскадные лазеры остаются довольно сложными в технологическом отношении и пока только несколько лабораторий в мире освоили технологию их создания [1,4,5]. В то же время для многочисленных практических применений требуются относительно простые источники ТГц излучения по типу ТГц светодиода. Одна из возможных схем сравнительно простого ТГц эмиттера может быть реализована с использованием оптических переходов между уровнями мелких примесей в полупроводниках. ТГц внутрицентровые излучательные переходы возникают при энергетической релаксации неравновесных носителей заряда, выброшенных с примесных центров в разрешенную зону, например, в результате ударной ионизации примесей в электрическом поле [6–10] или при фотоионизации примесных центров

излучением  $\text{CO}_2$ -лазера [11,12]. Важно отметить, что на внутрицентровых переходах в Ge и Si была получена ТГц лазерная генерация [7,11,12]. Недавно было показано, что ТГц внутрицентровые излучательные переходы могут возбуждаться также при межзонной оптической накачке полупроводников, легированных мелкими примесными центрами, и такая ТГц фотолюминесценция была обнаружена в целом ряде материалов [13–15]. ТГц фотолюминесценция (ФЛ) обусловлена особенностями рекомбинации неравновесных носителей заряда с участием примесных центров. Такая рекомбинация приводит к образованию системы заряженных примесных центров (например, доноров) и свободных носителей в разрешенной зоне (например, электронов в зоне проводимости). Захват свободных носителей на заряженные примеси сопровождается ТГц излучением, аналогично ситуации, имеющей место при электрическом пробое примесных центров [6–10]. Необходимо подчеркнуть, что аналогичные процессы могут приводить к примесному ТГц излучению и при электрической инжекции неравновесных носителей заряда в легированный материал, например, в  $p-n$ -структурах. Такой тип ТГц электролюминесценции (ЭЛ) был недавно обнаружен в структурах с  $p-n$ -переходом на основе  $4H\text{-SiC}$  [16]. Источники ТГц излучения на примесных переходах в кремнии особенно интересны, поскольку они допускают прямую интеграцию с кремниевой электроникой.

В настоящей работе сообщается об обнаружении и исследовании ТГц ЭЛ при прямом смещении  $p-n$ -структур на основе кремния при гелиевых температурах,  $T \approx 7 \text{ К}$ .

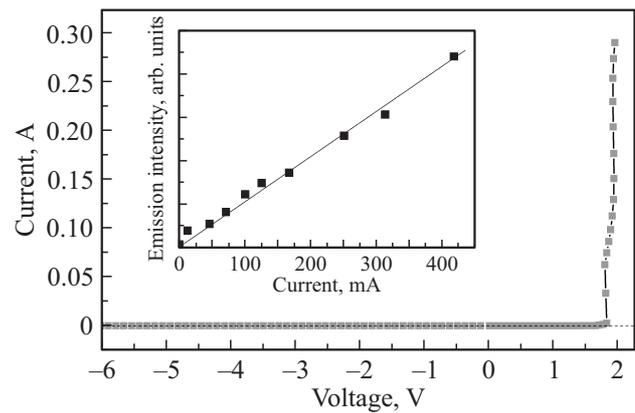
## 2. Детали эксперимента

Исследования проводились на асимметричных  $p^+-n$ -структурах, созданных диффузией бора в подложку  $n$ -Si с удельным сопротивлением  $250 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (основная примесь — фосфор, концентрация нескомпенсированных доноров  $N_D - N_A \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ). Концентрация нескомпенсированных акцепторов в  $p^+$ -области структур составляла  $N_A - N_D \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Такие параметры легирования структур обеспечивали практически одностороннюю инжекцию неравновесных носителей заряда при прямом смещении, а именно инжекцию дырок в  $n$ -область. Толщина подложек составляла  $400 \text{ мкм}$ , а толщина  $p^+$ -области была  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Образцы для исследований были приготовлены в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами  $3 \times 3 \times 0.4 \text{ мм}$ . Электрический контакт к подложке был сплошным и наносился на нижнюю грань образца. Второй контакт (контакт к  $p^+$ -области) наносился на верхнюю грань образца и имел форму диска с диаметром окна  $1.5 \text{ мм}$ .

Исследуемые образцы укреплялись на хладопроводе гелиевого оптического криостата, оптимизированного для ТГц области спектра. Электрическое смещение на образцы подавалось в виде пачек прямоугольных импульсов, следовавших с частотой  $75 \text{ Гц}$ . Каждая пачка содержала по 8 импульсов длительностью  $220 \text{ мкс}$  и временным интервалом между импульсами  $660 \text{ мкс}$ . Такое смещение было выбрано для минимизации влияния на результаты измерений джоулевого нагрева исследуемых образцов. Спектральные измерения проводились с использованием фурье-спектрометра на область спектра  $5\text{--}350 \text{ см}^{-1}$  с шаговым сканированием интерферограммы, что описано в деталях в [10,17]. Спектральное разрешение в большинстве случаев составляло  $8 \text{ см}^{-1}$ . Сигнал ТГц излучения измерялся с помощью охлаждаемого жидким гелием Si-болометра методом синхронного детектирования на частоте следования пачек импульсов электрического смещения ( $75 \text{ Гц}$ ). В ходе измерений температура на хладопроводе криостата не превосходила  $7 \text{ К}$ , что контролировалось германиевым термометром сопротивления, укрепленном в непосредственной близости от исследуемого образца.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показана типичная для исследованных кремниевых  $p^+-n$ -структур вольт-амперная характеристика (ВАХ), измеренная на постоянном токе при  $T \approx 7 \text{ К}$ . Из рисунка видно, что структуры имеют более или менее обычные выпрямляющие свойства даже при гелиевых температурах. При концентрации примесей в  $p^+$ -области кремниевой структуры  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$  примесные центры делокализованы, а газ дырок вырожден. Поэтому в широком интервале температур, включая



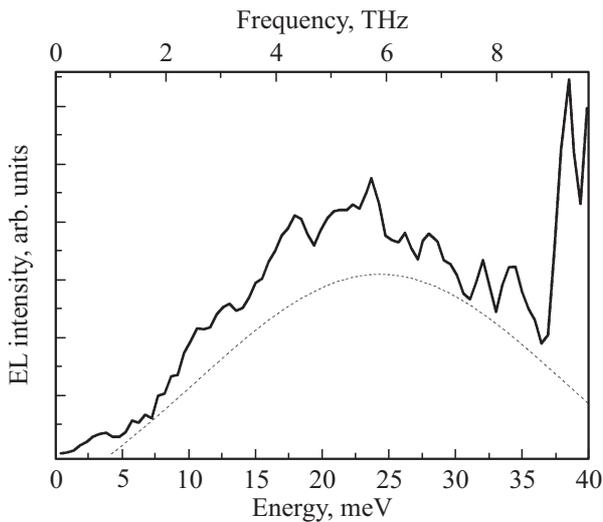
**Рис. 1.** ВАХ кремниевой  $p^+-n$ -структуры при  $T \approx 7 \text{ К}$ . На вставке — зависимость интегральной интенсивности ТГц излучения от амплитуды импульса тока инжекции.

гелиевые температуры, имеет место нормальное протекание тока через структуру, обусловленное инжекцией дырок в  $n$ -область структуры.

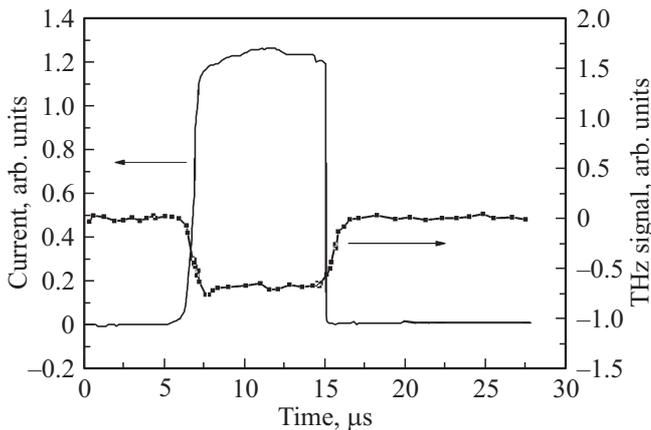
Измерения спектрально интегрированного ТГц излучения в полосе частот использованного фурье-спектрометра показали, что излучение наблюдается только при прямом смещении структур. При этом ТГц электролюминесценция видна при наблюдении как со стороны верхней грани, так и с торца образца. Было установлено, что в последнем случае (при наблюдении с торца структуры) интенсивность ТГц излучения была в несколько раз выше, чем в случае наблюдения со стороны верхней грани, что, скорее всего, обусловлено более сильным влиянием поглощения на свободных носителях в  $p^+$ -слое структуры при выводе излучения по нормали к верхней грани. Поэтому основные измерения ТГц электролюминесценции проводились в геометрии наблюдения излучения с торца структур. На вставке к рис. 1 показана зависимость сигнала интегральной ТГц электролюминесценции от амплитуды импульса тока через структуру. Можно видеть, что интенсивность ТГц ЭЛ практически линейно зависит от тока инжекции.

На рис. 2 показан характерный спектр инжекционной ТГц ЭЛ кремниевых  $p^+-n$ -структур. Как можно видеть, спектр ТГц излучения содержит плавный, широкий фон, на который накладываются сравнительно узкие линии излучения. Аналогичный характер спектров ТГц электролюминесценции наблюдался ранее и в  $p^+-n$ -структурах на основе  $4H\text{-SiC}$  [16].

Контрольные эксперименты по измерению временных характеристик интегральной ТГц ЭЛ из  $p^+-n$ -структур на основе Si с использованием быстрого ТГц фотоприемника на основе фотосопротивления Ge(Ga), расположенного вблизи исследуемой кремниевой структуры, показали, что сигнал ТГц ЭЛ достаточно быстрый (см. рис. 3) и воспроизводит форму импульса тока инжекции с точностью до времени отклика фотоприемника (время отклика использованного Ge(Ga)-фотоприемника, измеренное



**Рис. 2.** Спектр ТГц электролюминесценции (EL)  $p^+ - n$ -структуры на основе Si при амплитудах импульса напряжения смещения 2.4 В и импульса тока 400 мА. Спектр излучения нормирован на спектральную чувствительность измерительной системы. Пунктирная кривая — плавная функция, подобранная для описания фона.



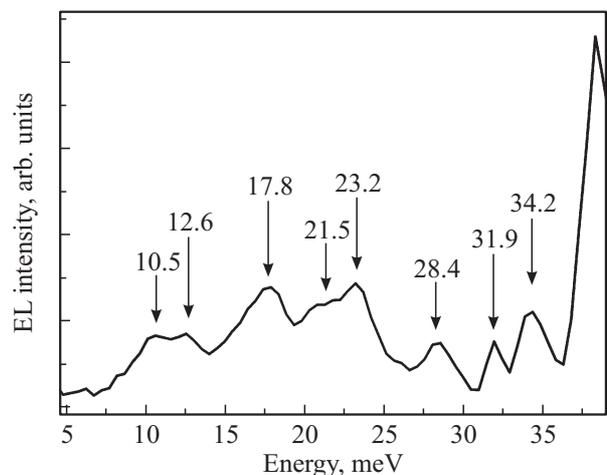
**Рис. 3.** Формы импульса прямого тока через исследуемую  $p^+ - n$ -структуру на основе Si и сигнала ТГц излучения, снимаемого с ТГц детектора на основе фотосопротивления Ge(Ga), расположенного вблизи исследуемой структуры.

в отдельном эксперименте, составляло  $\sim (1.3 - 1.5)$  мкс и определялось емкостью кабеля и балластным сопротивлением в схеме фотопроводимости). Этот факт свидетельствует о том, что наблюдаемая ТГц ЭЛ из кремниевых  $p^+ - n$ -структур имеет чисто электронную природу, а тепловой вклад, который мог бы иметь место вследствие разогрева решетки, несуществен в данных экспериментальных условиях. Широкий фон, имеющий место в спектре ТГц ЭЛ (см. рис. 2), возможно, обусловлен ТГц излучением при внутризонной энергетической релаксации горячих носителей заряда с эффективной температурой  $T_e$ , превышающей температуру решетки, которые возникают в структуре в результате инжекции.

Бесструктурный фон можно математически вычистить из наблюдаемого спектра ТГц излучения с использованием подобранной гладкой функции (см. пример такой функции на рис. 2), описывающей фон. На рис. 4 показан модифицированный спектр ТГц излучения, полученный после вычитания фона.

Ряд линий в спектре ТГц излучения (рис. 4) по своему спектральному положению находится в неплохом согласии с ожидаемыми линиями внутрицентровых оптических переходов в донорах фосфора в Si [18]. Линии с максимумами при 21.5 и 34.2 мэВ могут быть отнесены к оптическим переходам электронов из возбужденного состояния донора фосфора  $2P_0$  на подуровни  $1S(E)$  и  $1S(A_1)$  основного состояния донора соответственно. Линия излучения при 23.2 мэВ близка по энергии к оптическим переходам между состояниями  $2P_0$  и  $1S(T_2)$  донора фосфора. Линии ТГц излучения с максимумами при 28.4 и 31.9 мэВ могут быть интерпретированы как оптические переходы на подуровень  $1S(T_2)$  основного состояния донора фосфора из возбужденных состояний  $3P_0$  и  $4P_{\pm}$  соответственно в хорошем согласии с данными дальнего инфракрасного (ИК) поглощения в Si(P) [18].

Терагерцовое излучение за счет внутрицентровых переходов в донорах фосфора при инжекции неравновесных дырок в  $n$ -область структуры может возникать в результате рекомбинации типа  $h - D^0$  (свободная дырка — электрон, связанный на доноре) [13,14], а также в результате донорно-акцепторной рекомбинации [16]. Такие рекомбинационные процессы приводят к образованию в  $n$ -области системы ионизованных доноров и свободных электронов, причем свободные электроны поступают в  $n$ -область структуры из контакта для сохранения условия электронейтральности в этой области. Захват свободных электронов на ионизованные доноры, в свою очередь, сопровождается внутрицентровыми переходами и соответственно приводит к ТГц люминесценции.



**Рис. 4.** Спектр ТГц электролюминесценции (EL), полученный из экспериментально измеренного спектра вычитанием фона. Стрелками отмечены максимумы линий излучения, обсуждаемых в тексте, энергии указаны в мэВ.

В спектре ТГц излучения (рис. 4) присутствуют также линии с максимумами при 10.5, 12.6 и 17.8 мЭВ, которые не удается отнести к внутрицентровым переходам в донорах фосфора. Однако нельзя исключать, что данные линии могут быть обусловлены оптическими переходами в акцепторах центрах. Действительно, оценки, проведенные с учетом результатов работ [19,20], в которых был выполнен расчет спектра энергии состояний акцепторов в Si включая примесь бора, показывают, что внутрицентровые оптические переходы с такими энергиями в акцепторах возможны. Возбуждение внутрицентровых переходов в акцепторных центрах также может иметь место в результате инъекции неравновесных носителей в исследованных структурах. С ТГц оптическими переходами в акцепторах, обусловленных примесью бора, возможно, связана и особенность при 38.4 мЭВ, которая видна на границе экспериментально доступного диапазона (см. рис. 4). Заметим, что линия поглощения при 38.4 мЭВ хорошо известна для Si(B) и относится к так называемой серии 3/2 в спектрах дальнего ИК поглощения [21].

Таким образом, обнаружена и исследована ТГц электролюминесценция, индуцированная токовой инъекцией неравновесных носителей заряда в кремниевых  $p^+-n$ -структурах при гелиевых температурах. Установлено, что излучение быстрое и имеет чисто электронную природу. Спектр ТГц электролюминесценции представляет собой суперпозицию плавного, широкого фона и сравнительно узких линий излучения. Максимумы ряда линий ТГц излучения, определенные после вычитания плавного фона, находятся в неплохом согласии с энергиями внутрицентровых оптических переходов из возбужденных состояний на подуровни  $1S(E)$ ,  $1S(T_2)$  и  $1S(A_1)$  основного состояния донора фосфора, являющегося основной легирующей примесью в  $n$ -области структуры. Внутрицентровые оптические переходы электронов в донорах фосфора возбуждаются в результате рекомбинационных процессов, которые инициируются инъекцией неравновесных дырок в  $n$ -область из  $p^+$ -эмиттера. Несколько линий в спектре ТГц электролюминесценции могут быть отнесены к внутрицентровым оптическим переходам в акцепторных центрах, которые также могут возбуждаться в результате инъекции. Плавный фон, имеющий место в спектре ТГц ЭЛ, вероятно, обусловлен излучением при внутризонной энергетической релаксации горячих носителей заряда. Такие горячие носители с эффективной температурой, превышающей температуру решетки, могут появляться в структуре в условиях инъекции.

Авторы (А.О. Захарьин, Ю.Б. Васильев и А.В. Андрианов) выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований, при поддержке которого была выполнена работа, а также ряд специальных программ Российской академии наук за частичную поддержку работы.

## Список литературы

- [1] M. Hanyo. Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 120101 (2015).
- [2] *Terahertz spectroscopy and imaging*, ed. by K.-E. Peiponen, J.A. Zeitler, M. Kuwata-Gonokami (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013).
- [3] P.H. Siegel. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **50**, 910 (2002).
- [4] R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram, H.E. Beere, E.H. Linfield, A.G. Davies, D.A. Ritchie, R.C. Iotti, F. Rossi. Nature, **417**, 156 (2002).
- [5] B.S. Williams. Nature Photonics, **1**, 517 (2007).
- [6] S.H. Koenig, R.D. Brown. Phys. Rev. Lett., **4**, 170 (1960).
- [7] Yu.P. Gousev, I.V. Altukhov, K.A. Korolev, V.P. Sinis, M.S. Kagan, E.E. Haller, M.A. Odnobludov, I.N. Yassievich, K.-A. Chao. Appl. Phys. Lett., **75**, 757 (1999).
- [8] T.N. Adam, R.T. Troeger, S.K. Ray, P.-C. Lv, J. Kolodzey. Appl. Phys. Lett., **83**, 713 (2003).
- [9] P.-C. Lv, R.T. Troeger, T.N. Adam, S. Kim, J. Kolodzey, I.N. Yassievich, M.A. Odnobludov, M.S. Kagan. Appl. Phys. Lett., **85**, 22 (2004).
- [10] А.В. Андрианов, А.О. Захарьин, И.Н. Яссиевич, Н.Н. Зиновьев. Письма ЖЭТФ, **79**, 448 (2004).
- [11] S.G. Pavlov, R.Kh. Zhukavin, E.E. Orlova, V.N. Shastin, A.V. Kirsanov, V.-W. Hubers, K. Auen, H. Riemann. Phys. Rev. Lett., **84**, 5220 (2000).
- [12] H.-W. Hubers, S.G. Pavlov, M. Greiner-Bar, M.H. Rummel, M.F. Kimmit, R.Kh. Zhukavin, H. Riemann, V.N. Shastin. Phys. Status Solidi B, **233**, 191 (2002).
- [13] А.О. Захарьин, А.В. Андрианов, А.Ю. Егоров, Н.Н. Зиновьев. Appl. Phys. Lett., **96**, 211118 (2010).
- [14] А.О. Захарьин, А.В. Бобылев, А.В. Андрианов. ФТП, **46**, 1158 (2012).
- [15] А.В. Андрианов, А.О. Захарьин, Р.Х. Жукавин, В.Н. Шастин, Н.В. Абросимов, А.В. Бобылев. Письма ЖЭТФ, **100**, 876 (2014).
- [16] A.V. Andrianov, J.P. Gupta, J. Kolodzey, V.I. Sankin, A.O. Zakhar'in, Yu.B. Vasilyev. Appl. Phys. Lett., **103**, 221101 (2013).
- [17] Н.Н. Зиновьев, А.В. Андрианов, В.Ю. Некрасов, Л.В. Беляков, О.М. Сресели, Г. Хилл, Дж.М. Чемберлен. ФТП, **36**, 234 (2002).
- [18] C. Jagannath, Z.W. Grabowski, A.K. Ramdas. Phys. Rev. B, **23**, 2082 (1981).
- [19] R. Buczko. Nuovo Cimento, **9**, 669 (1987).
- [20] R. Buczko, F. Bassani. Phys. Rev. B, **45**, 5838 (1992).
- [21] A. Onton, P. Fisher, A.K. Ramdas. Phys. Rev., **163**, 686 (1967).

Редактор Л.В. Шаронова

## Injection terahertz electroluminescence of silicon $p-n$ -structures

A.O. Zakhar'in<sup>1</sup>, Yu.B. Vasilyev<sup>1</sup>, N.A. Sobolev<sup>1</sup>,  
V.V. Zabrodskii<sup>1</sup>, S.V. Egorov<sup>2</sup>, A.V. Andrianov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Mining University,

199006 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The injection induced terahertz electroluminescence from silicon  $p^+-n$ -structures at helium temperatures has been observed. The structures created by diffusion of boron into a phosphorus doped  $n$ -Si substrate were studied. Relatively narrow luminescence lines superimposed on a broad, smooth background are observed in the luminescence spectra. Spectral position of a row emission lines corresponds to optical transitions between excited donor states and the ground state of phosphorus donors. The intracenter optical transitions of electrons in phosphorus donors are excited due to recombination processes, which occur in the  $n$ -region of the structure under injection of nonequilibrium holes. A row of other lines in the terahertz emission spectra corresponds to intracenter transitions in acceptor centers, which are excited also as a result of injection. The structureless background in the electroluminescence spectra can be caused by the terahertz emission under intraband energy relaxation of „hot“ charge carriers with effective temperature exceeding lattice temperature. Such „hot“ carriers appear in the structure under injection conditions.