

# Кинетика релаксации примесной фотопроводимости в $p\text{-Si}:\text{B}$ с различным уровнем легирования и степенью компенсации в сильных электрических полях

© С.В. Морозов<sup>+‡</sup>, В.В. Румянцев<sup>+‡¶</sup>, К.Е. Кудрявцев<sup>+</sup>, В.И. Гавриленко<sup>+‡</sup>, Д.В. Козлов<sup>+‡</sup>

<sup>+</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>‡</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Исследуется релаксация примесной фотопроводимости в  $p\text{-Si}:\text{B}$  при импульсном оптическом возбуждении узкополосным перестраиваемым источником излучения в „греющих“ (10–500 В/см) электрических полях. Обнаружено изменение характера зависимости времени релаксации от электрического поля при  $E > 75$  В/см за счет подключения процессов релаксации с испусканием оптического фонона. Зависимость темпов релаксации носителей от интенсивности и длины волны возбуждающего излучения указывает также на наличие долгоживущего возбужденного состояния, играющего роль уровня прилипания при релаксации носителей.

## 1. Введение

Полупроводники, легированные примесью с малой, до 100 мЭВ, энергией ионизации, на протяжении многих лет являются одним из основных объектов исследований, связанных с детектированием излучения дальнего инфракрасного (ИК) диапазона и возможностью создания инверсии населенностей с участием состояний мелких примесей [1,2]. При решении подобных задач важно знать не только энергетические спектры, но и времена жизни носителей в зоне и на уровнях примеси, а также механизмы захвата возбужденных носителей на притягивающие центры. Одним из простых методов получения информации о темпах захвата носителей является изучение кинетики релаксации примесной фотопроводимости (ФП). Ранее было продемонстрировано [3–6], что во многих случаях важным является анализ влияния приложенного электрического поля на времена релаксации носителей, особенно в „греющих“ полях и полях, близких к примесному пробую.

На данный момент накоплено значительное количество экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов, касающихся вопроса времен жизни неравновесных носителей в объемных полупроводниках при внутризонном возбуждении, однако большинство экспериментальных значений получены из косвенных измерений. Для определения времени жизни  $\tau$  использовалось либо условие стационарного процесса  $G = n/\tau$  [7,8] ( $n$  — стационарная концентрация неравновесных носителей,  $G$  — скорость их генерации), либо время демодуляции сигнала фотоотклика при низкочастотной модуляции электромагнитной волны при смешении излучений с двумя близкими частотами на исследуемом образце (см., например, [9,10]).

Метод pump-probe спектроскопии, несмотря на его возросшую популярность на протяжении последних де-

сятилетий, является достаточно сложным и, в случае когда накачка и зондирование осуществляются с одинаковой энергией кванта излучения, не дает информации о временах захвата носителей на возбужденные состояния примесных центров, так как изменение сигнала пропускания на фиксированной частоте возбуждающего импульса происходит только после возвращения носителя на основное состояние примеси. Более подробные рассуждения об избирательности метода pump-probe спектроскопии приведены в нашей работе [6], здесь отметим лишь, что в случае достаточно глубоких примесных центров (в частности, бора в кремнии) время жизни носителя на возбужденных состояниях примеси может быть значительным [10] и вносить существенную погрешность в эксперимент. С другой стороны, для фотоэлектрических приемников наибольший интерес представляют времена жизни носителей в зоне, которые можно определить из исследований кинетики релаксации фотоотклика при возбуждении коротким оптическим импульсом.

## 2. Методика эксперимента

В данной работе для определения времени захвата носителей в объемном кремнии, легированном бором, использовалась прямая методика исследования релаксации сигнала примесного фотоотклика при возбуждении узкополосным импульсным излучением с возможностью перестройки длины волны в диапазоне 11–17 мкм (энергия кванта 72–112 мЭВ). Данная методика не только дает информацию о времени жизни носителей в зоне, но и позволяет детально исследовать кинетику релаксации примесной ФП, которая может быть отлична от экспоненциальной. Сигнал, регистрируемый на цифровом осциллографе „Le Croy“ с верхней граничной частотой 1 ГГц, выводился с помощью 50-омного кабеля и

<sup>¶</sup> E-mail: rumyantsev@ipmras.ru, more@ipmras.ru

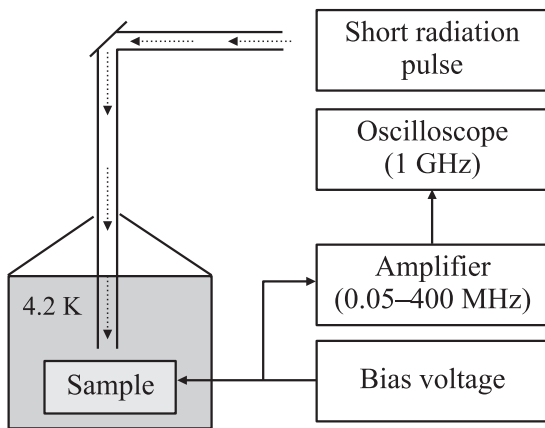


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования кинетики релаксации фотопроводимости.

усиливался усилителем с 50-омными входным и выходным сопротивлением с полосой пропускания 400 МГц. Временное разрешение метода определялось длительностью импульса и составляло 7 нс. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Исследования релаксации примесной ФП выполнены в диапазоне электрических полей от 10 до 500 В/см, при различных интенсивностях возбуждающего излучения. Измерения проводились при температуре жидкого гелия. Параметры исследуемых образцов  $p$ -Si:V ( $E_A = 45$  мэВ) представлены в таблице.

Параметры исследуемых образцов

Номер образца	$N_A$ , см <sup>-3</sup>	$N_D$ , см <sup>-3</sup>	Степень компенсации, %
0	$8 \cdot 10^{14}$	$1.6 \cdot 10^{14}$	20
3539	$4.1 \cdot 10^{15}$	$1.7 \cdot 10^{15}$	41
1454	$5 \cdot 10^{14}$	$3.3 \cdot 10^{14}$	66

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены зависимости времени релаксации ФП от электрического поля для различных образцов. Наблюдаемый рост времени релаксации на начальном участке зависимости был обнаружен в Si:V еще в работе [7] и получил теоретическое обоснование в многочисленных работах (см., например, [11]) по модели каскадного захвата носителей с испусканием акустических фононов. Увеличение времени релаксации фотопроводимости в данной модели связывается с разогревом носителей в электрическом поле, а также с разрушением верхних возбужденных примесных состояний вследствие асимметричного „наклона“ примесного потенциала при приложении поля. Подобное поведение времени релакса-

ции ФП нами было обнаружено и в объемном  $p$ -Ge [5], а также в гетероструктурах Ge/GeSi [4].

В области 50–80 В/см рост времени во всех образцах существенно замедляется, а в образцах 0 и 3539 вместо роста начинается спад зависимости  $\tau(E)$  при более высоких электрических полях. Такое поведение связано с подключением механизмов релаксации с испусканием оптических фононов в условиях сильного разогрева носителей. На время релаксации фотопроводимости могут оказывать влияние как прямой захват на основное и возбужденные состояния примесного центра, так и трансформация функции распределения в сильных электрических полях. В работе [6] нами было обнаружено уменьшение времени захвата носителей в окрестности резонанса Фано, обусловленного взаимодействием оптического фонона и возбужденного состояния примеси LO —  $2p \approx 94$  мэВ. Учитывая, что провал на спектре фотопроводимости, связанный с LO —  $1s$  переходом (на основное состояние), выражен значительно ярче, следует ожидать, что его влияние на захват носителей будет сильнее.

Был выполнен оценочный расчет функции распределения дырок путем решения уравнения Больцмана с интегралом столкновений, включающим рассеяние на акустических и оптических фононах, который показал, что в поле 50 В/см энергии оптического фонона достигает около 5% частиц, тогда как в полях 75 и 100 В/см до „фононной крыши“ разогревается 11 и 20% частиц соответственно. При этом функция распределения вытягивается вдоль поля, а носители, достигающие энергии, достаточной для испускания оптического фонона, быстро переходят на дно зоны, в результате чего средняя энергия ансамбля дырок уменьшается. На рис. 2 приведена рассчитанная зависимость средней энергии (пунктирная линия), которая согласуется с экспериментальными данными.

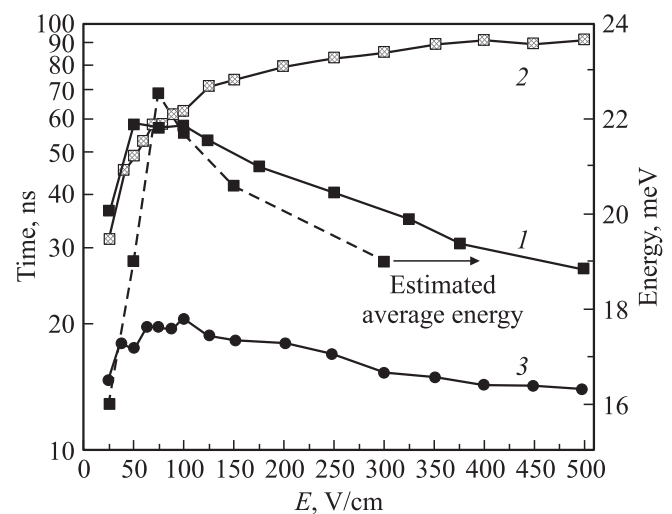
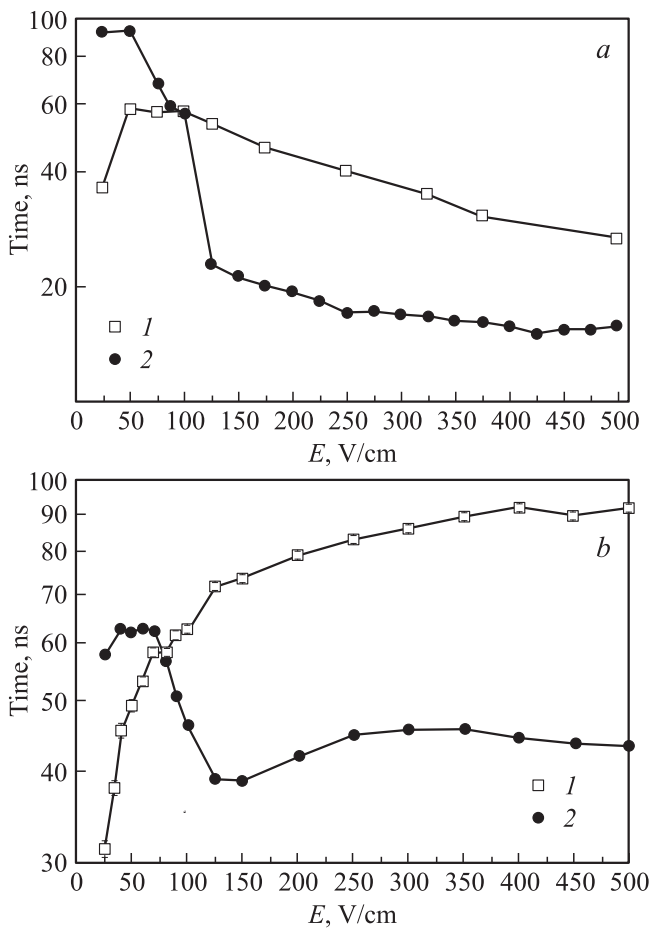


Рис. 2. Зависимость времени релаксации примесной фотопроводимости от приложенного электрического поля для различных образцов: 1 — 0, 2 — 1454, 3 — 3539.

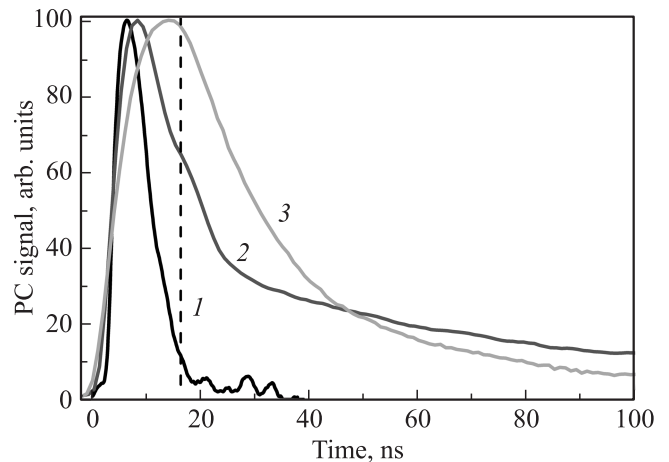


**Рис. 3.** Зависимость времени релаксации от электрического поля для образцов 0 (а) и 1454 (b) при различных интенсивностях возбуждающего излучения: 1 —  $10^{12}$  фотонов/см<sup>2</sup> в импульсе, 2 —  $10^{15}$  фотонов/см<sup>2</sup> в импульсе.

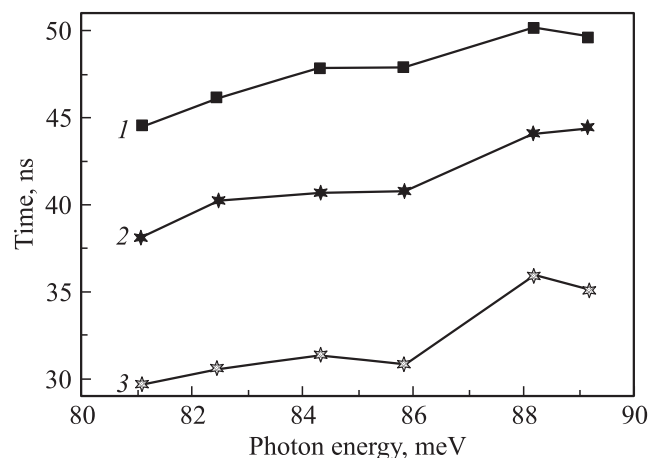
На рис. 3а,б приведены исследования зависимости времени релаксации фотопроводимости от мощности возбуждающего излучения. Видно, что в полях больше 100 В/см время релаксации ФП уменьшается при росте интенсивности возбуждающего излучения, что обусловлено увеличением количества центров захвата в результате дополнительной ионизации акцепторов, а также может быть связано с подключением эффектов междырочного взаимодействия (см. [12]). Противоположное поведение времени наблюдается в полях до 100 В/см. В этих полях время релаксации значительно возрастает при увеличении интенсивности возбуждения. Форма осциллограммы фотоотклика при этом существенно неэкспоненциальна (рис. 4, кривая 2) — после окончания возбуждающего импульса наблюдается сначала быстрый спад сигнала ФП, который затем сменяется более медленным спадом. Такое поведение можно объяснить наличием метастабильного возбужденного состояния, играющего роль уровня прилипания при релаксации носителя. Ударная ионизация с такого уровня возможна даже в невысоких полях, а переход на основное состояние может быть относительно долгим [10], что приводит

к возникновению эффекта „бутылочного горлышка“ и замедлению процессов релаксации фотопроводимости. В осциллограмме фотоотклика при этом наблюдаются два временных масштаба. Похожий эффект наблюдался и в объемном *p*-Ge [5], а также в гетероструктурах Ge/GeSi [4] в электрических полях, близких к примесному пробую.

В полях менее 100 В/см рост интенсивности возбуждающего излучения, который влечет за собой увеличение заселенности возбужденных состояний после окончания импульса, приводит к усилению процесса выброса дырок обратно в зону и, таким образом, к увеличению времени релаксации ФП. С ростом электрического поля возбужденные уровни разрушаются вследствие наклона потенциала примеси во внешнем электрическом поле (согласно [12], в поле 100 В/см разрушены возбужденные состояния с энергией связи менее 2.2 мэВ) и захват происходит на более глубокие состояния, что приводит к ослаблению данного эффекта (рис. 3, кривая 2).



**Рис. 4.** 1 — профиль импульса возбуждающего излучения; 2, 3 — осциллограммы фотоотклика в условиях сильного возбуждения для  $E = 50$  и  $500$  В/см соответственно.



**Рис. 5.** Зависимости времени релаксации примесной фотопроводимости от длины волны возбуждающего излучения для различных электрических полей, В/см: 1 — 180, 2 — 250, 3 — 380.

В области полей больше 100 В/см при перестройке энергии кванта возбуждающего излучения было обнаружено увеличение времени релаксации с ростом энергии кванта (см. рис. 5). В условиях сильного разогрева, когда возможны переходы с участием оптических фононов как на основное состояние примеси, так и на возбужденные, большая начальная энергия фотовозбужденных носителей ведет к большей заселенности высоковозбужденных состояний, с которых возможен уход носителей обратно в зону. Оценки показывают, что время установления функции распределения составляет не менее 2.5 нс, что согласуется по величине с изменением времени релаксации при перестройке частоты возбуждающего излучения.

#### 4. Заключение

В данной работе проведен цикл исследований по изучению релаксации примесной фотопроводимости в объемных образцах  $p$ -Si: B с различной концентрацией ( $5 \cdot 10^{14}$ – $4.1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ) и уровнем компенсации примеси (20–66%) в зависимости от постоянного электрического поля (10–500 В/см).

В полях, больших 75 В/см, наблюдается увеличение темпов релаксации примесной фотопроводимости. Расчет функции распределения показывает, что наблюдающийся в сильных электрических полях спад времени релаксации неравновесных дырок может быть объяснен уменьшением их средней энергии за счет активного рассеяния на оптических фононах и прямыми переходами на основное состояние примеси. Обнаружено также, что время релаксации примесной ФП в полях до 100 В/см увеличивается с ростом интенсивности возбуждающего излучения, что свидетельствует о наличии долгоживущего возбужденного состояния, уход с которого носителей обратно в зону существенно замедляет кинетику релаксации фотопроводимости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 13-02-01154-а, 13-02-00404-а) и программ РАН.

#### Список литературы

- [1] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, М.А. Одноблудов, В.П. Синис, Е.Г. Чиркова, И.Н. Ясиевич. *ЖЭТФ*, **115** (1), 89 (1999).
- [2] H.-W. Hübers, S.G. Pavlov, V.N. Shastin. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 211 (2005).
- [3] G.L.J.A. Rikken, P. Wyder, J.M. Chamberlain and R.T. Grimes, L.L. Taylor. *Phys. Rev. B*, **38** (6), 4156 (1988).
- [4] S.V. Morozov, L.V. Gavrilenko, I.V. Erofeeva, A.V. Antonov, K.V. Maremyanin, A.N. Yablonskiy, D.I. Kuritsin, E.E. Orlova, V.I. Gavrilenko. *Semicond. Sci. Technol.*, **26** 085 009 (2011).
- [5] С.В. Морозов, К.В. Маремьянин, И.В. Ерофеева, А.Н. Яблонский, А.В. Антонов, Л.В. Гавриленко, В.В. Румянцев, В.И. Гавриленко. *ФТП*, **44** (11), 1523 (2010).
- [6] В.В. Румянцев, С.В. Морозов, К.Е. Кудрявцев, В.И. Гавриленко, Д.В. Козлов. *ФТП*, **46** (11), 1414 (2012).
- [7] Э.Э. Годик, Ю.А. Курицын, В.П. Синис. *ФТП*, **12**, 351 (1978).
- [8] Н.А. Бекин, Р.Х. Жукавин, К.А. Ковалевский, С.Г. Павлов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, В.Н. Шастин. *ФТП*, **39** (1), 76 (2005).
- [9] Е.М. Гершензон, Г.Н. Гольцман, В.В. Мултановский, Н.Г. Птицина. *ЖЭТФ*, **77** (4), 1134 (1979).
- [10] Я.Е. Покровский, О.И. Смирнова. *Письма ЖЭТФ*, **51** (7), 377 (1990).
- [11] В.Н. Абакумов, П.М. Крещук, И.Н. Ясиевич. *ФТП*, **12**, 264 (1978).
- [12] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясиевич. *Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках* (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 1997).

Редактор Т.А. Полянская

#### Relaxation kinetics of the impurity photoconductivity in $p$ -Si: B with different doping and compensation concentration in strong electric field

S.V. Morozov<sup>+≠</sup>, V.V. Rumyantsev<sup>+≠</sup>,  
K.E. Kudryavtsev<sup>+</sup>, V.I. Gavrilenko<sup>+≠</sup>, D.V. Kozlov<sup>+≠</sup>

<sup>+</sup> Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhni Novgorod, Russia  
<sup>≠</sup> Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod,  
603950 Nizhni Novgorod, Russia

**Abstract** We study the relaxation kinetics of the impurity photoconductivity in  $p$ -Si: B under pulsed optical excitation in the strong (10–500 V/cm) electric fields. It is found that the dependence of the relaxation time on the electric field changes its behavior when  $E > 75$  V/cm due to the relaxation processes involving optical phonons. The dependence of the carrier relaxation rate on the intensity and wavelength of the excitation indicates the presence of long-lived excited state, which leads to the delay of the carrier relaxation.