

Аномальная релаксация фотопроводимости в кремнии при высоких уровнях инжекции

© П.А. Бородавский, А.Ф. Булдыгин, С.В. Голод[†]

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 2 июня 2008 г. Принята к печати 20 июня 2008 г.)

Исследуется аномальный эффект релаксации неравновесных носителей заряда в образцах кремния при их возбуждении импульсным светом лазерного диода (1060 нм/500 мВт). Эксперименты проводились при высоких уровнях инжекции как с использованием СВЧ-измерений проводимости, так и обычной методики измерения релаксации фотопроводимости. Необычное явление наблюдалось в начальной области релаксации фотопроводимости после окончания импульса света. Предлагается упрощенная модель для объяснения аномального эффекта, включающая экситоны при высоких уровнях возбуждения.

PACS: 71.55.Cn, 71.35.-y, 72.40.+w

Рекомбинация неравновесных носителей заряда (ННЗ) в кремнии, в том числе и при высоких уровнях возбуждения (инжекции), достаточно хорошо изучена в большом числе работ. При высоких уровнях инжекции линейная рекомбинация имеет место до определенных значений концентрации носителей заряда, выше которой начинает проявляться нелинейная рекомбинация, обусловленная межзонной излучательной и безызлучательной оже-рекомбинацией. Скорость рекомбинации определяется как

$$R = An + Bn^2 + Cn^3,$$

где $A = 1/\tau_{\infty}$; $B \approx 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ и $C = 3 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$ [1].

Даже в очень чистом кремнии при $\tau_{\infty} = 10 \text{ мс}$ переход в режим нелинейной рекомбинации будет иметь место при $n \geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Следует отметить, однако, что в кремнии очень высокого качества коэффициент оже-рекомбинации $C = 2 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$ [2], а значит, переход в режим нелинейной рекомбинации возможен и при $n > 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

В слитках кремния (*n*-Si), выращенных методом бесстигельной зонной плавки (БЗП), значения времени жизни τ_{∞} , по СВЧ-измерениям [3], могут достигать 10–20 мс, но перехода в обычный режим нелинейной рекомбинации не наблюдается. Вместо этого имеет место переход в режим „аномальной фотопроводимости“. Результаты СВЧ-измерений этого необычного эффекта приведены в сообщении [4]. В этой работе приведены первые результаты по наблюдению аномальной фотопроводимости (ФП) в слитках БЗК-кремния. Отмечается также, что измеренные сигналы ФП с аномальной релаксацией аналогичны по форме сигналам ФП при СВЧ-измерениях образца германия, расположенного в поперечном сечении волновода [5]. Наблюдаемая аномальная релаксация сигнала ФП в работе [5] объясняется резонансным поглощением СВЧ-излучения. Приведенный в работе [4] аналогичный приближенный анализ,

хотя и согласуется с результатами измерений, но не позволяет сделать окончательный вывод о механизме аномальной релаксации ФП, поэтому необходимы дальнейшие исследования.

В настоящей работе рассмотрены результаты исследований аномальной релаксации ФП в кремнии с использованием СВЧ-метода и обычного метода измерения ФП образца с омическими контактами.

Упрощенная схема измерений приведена на рис. 1. Образец *n*-Si (1330 Ом·см) с размерами $10 \times 10 \times 25 \text{ мм}$ расположен между двумя соосными волноводами сечением $10 \times 23 \text{ мм}^2$. Проходящая мощность СВЧ-излучения регистрируется детектором и выходной „сигнал ФП“ наблюдается на экране цифрового осциллографа. На втором канале регистрируется сигнал ФП с сопротивления $R_L = 600 \text{ Ом}$, включенного последовательно с образцом к источнику постоянного напряжения ($U_0 = 1 \text{ В}$). Образец освещается лазерным диодом (ЛД) с мощностью излучения до 500 мВт в непрерывном режиме и длиной волны $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$ (ЛД типа ИЛПН-1П-500-1.06). Расстояние от ЛД до поверхности образца может регулироваться: при расстоянии $\sim 3 \text{ мм}$ размер „светового пятна“ $\sim 2 \times 0.5 \text{ мм}$ и, следовательно, интенсивность падающего света до 50 Вт/см^2 и выше в импульсном режиме.

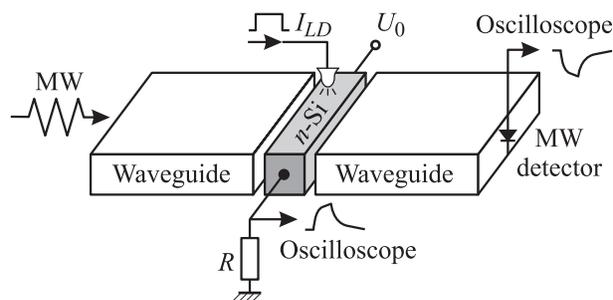


Рис. 1. Упрощенная схема измерения фотопроводимости образца кремния на СВЧ и на постоянном токе.

[†] E-mail: golod@isp.nsc.ru

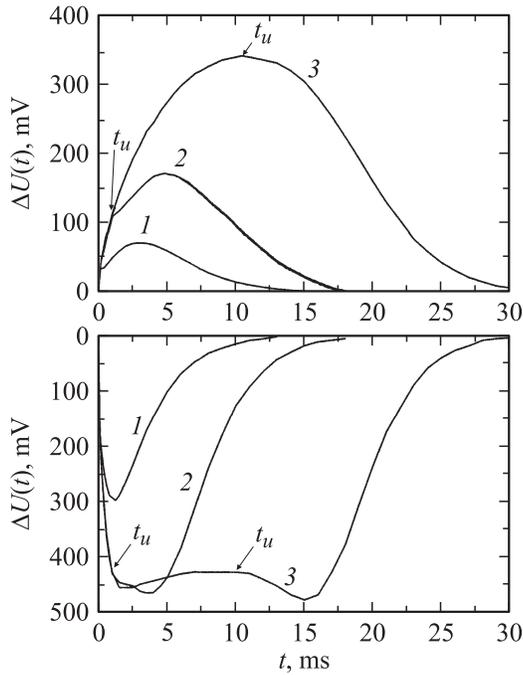


Рис. 2. Сигналы фотопроводимости, измеренные на постоянном токе (верхняя часть рисунка) и на СВЧ (нижняя часть) при различных длительностях импульса тока лазерного диода t_u , мс: 1 — 0.1, 2 — 1, 3 — 10. Образец n -Si (1330 Ом·см). Расстояние ЛД от поверхности образца ~ 3 мм, ток ЛД — 1.8 А.

При относительно малых токах ЛД (≤ 0.2 А) осциллограммы сигналов ФП, измеренных на СВЧ и на постоянном токе, имеют обычную форму релаксации ФП и при совмещении осциллограмм по двум каналам практически не отличаются друг от друга.

Однако с увеличением интенсивности света (ток ЛД выше 0.5 А) форма сигналов ФП на обоих каналах начинает изменяться, а именно проявляются замедление спада сигнала ФП в начальной области (после окончания импульса света) и даже возрастание уровня сигнала ФП при больших токах ЛД (~ 1.5 А).

На рис. 2 приведены результаты измерений (осциллограммы) сигналов ФП при токе ЛД 1.6 А и длительности импульса 0.1 (кривая 1), 1 (2) и 10 мс (3). Форма кривых релаксации ФП, измеренной на постоянном токе (верхняя часть рис. 2) и на СВЧ (нижняя часть рис. 2), имеет явно аномальный вид. После окончания импульса света $\tau_p = 0.1$ и 1 мс сигнал ФП, а следовательно, и неравновесная проводимость $\Delta\sigma(t)$ продолжают расти, достигая максимума спустя значительное время. При импульсе света $\tau_p = 10$ мс на постоянном токе роста $\Delta\sigma(t)$ не наблюдается в области ($t > \tau_p$), но в течение примерно 2 мс сохраняется постоянный уровень сигнала ФП. Измеренные сигналы ФП на СВЧ отличаются от сигналов ФП на постоянном токе, особенно сигнал ФП при $\tau_p = 10$ мс. Для объяснения этих различий нужен детальный анализ, учитывающий также и нелинейность

характеристики СВЧ-детектора, поскольку амплитуда сигнала ФП близка к уровню постоянного напряжения на выходе детектора (650 мВ) при отсутствии освещения.

Следует отметить также, что и в области нарастания сигнала ФП ($t \ll \tau_p$) сигналы ФП, измеренные на постоянном токе и на СВЧ, существенно различаются. Эти различия, по-видимому, можно объяснить локальной генерацией ННЗ „световым пятном“ малых размеров и „расплыванием“ области ННЗ вследствие диффузии. Измеренный на СВЧ сигнал ФП пропорционален полному числу ННЗ [3], и этот эффект „расплывания“ не проявляется.

Отметим также, что при значительном ослаблении интенсивности света, например, поместив несколько листов писчей бумаги между ЛД и образцом, можно добиться нормальной формы релаксации сигнала ФП, близкой к экспоненте с $\tau_{\text{eff}} \approx 2$ мс.

Для выяснения, не связан ли наблюдаемый аномальный эффект при наших измерениях с какими-либо особенностями БЗП кремния, выращенного в Институте физики полупроводников СО РАН, были проведены СВЧ измерения ФП слитка кремния КЭФ-45 (завод „Красцветмет“). Слиток длиной 22 мм и диаметром 100 мм помещался между двумя волноводными рупорами с раскрытием 38×38 мм². Освещение торца слитка проводилось через волновод (10×23 мм²) в начале рупора и ЛД находился на расстоянии ~ 150 мм от торца слитка. Уровень мощности СВЧ-излучения, проходящего через длину слитка 22 мм, был вполне достаточным для уверенной регистрации сигнала ФП даже при малой интенсивности падающего света на поверхность торца слитка.

Результаты измерений сигналов ФП (осциллограммы) в нормированном виде $U(t)/U(0)$ (где $U(0)$ — напряжение на детекторе в момент выключения светового импульса) приведены на рис. 3 при токах ЛД: 0.22 и 1.6 А. При малой интенсивности света ($I_{\text{LD}} = 0.22$ А) наблюдается сигнал ФП обычного вида (кривая 1). Форма сигнала хорошо согласуется с расчетной кривой релаксации полного числа ННЗ [3] (пунктир) при значениях коэффициента поглощения света $\alpha = 15$ см⁻¹, коэффициента диффузии $D \approx D_p = 12$ см²/с и времени жизни $\tau = 3$ мс.

При высоком уровне возбуждения ($I_{\text{LD}} = 1.6$ А) форма сигнала ФП сильно изменяется как в области нарастания ($t \ll \tau_p$), так и в области спада ($t > \tau_p$) (кривая 2). Наблюдаемый эффект „аномальной фотопроводимости“ нельзя объяснить известными механизмами нелинейной рекомбинации, в том числе и с учетом эффекта „прилипания“. Одной из возможных причин наблюдаемой аномалии при высоких уровнях возбуждения ННЗ мы предполагаем образование достаточно высокой концентрации экситонов. В пользу этой гипотезы свидетельствует необычно высокая крутизна нарастания сигнала ФП. В области $t \ll \tau_p$ сигнал ФП практически повторяет световой импульс. Это имеет место потому, что

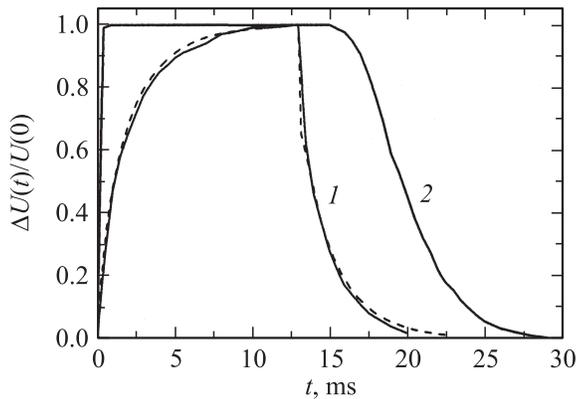


Рис. 3. Сигналы фотопроводимости, измеренные на СВЧ в слитке кремния КЭФ-45 (диаметр 100 мм, длина 22 мм) при токах ЛД: 1 — 0,22, 2 — 1,6. Пунктирная линия — расчетная кривая релаксации полного числа ННЗ при $t = 3$ мс, $\alpha = 15 \text{ см}^{-1}$ и $D = D_p = 12 \text{ см}^2/\text{с}$ по формулам из работы [3].

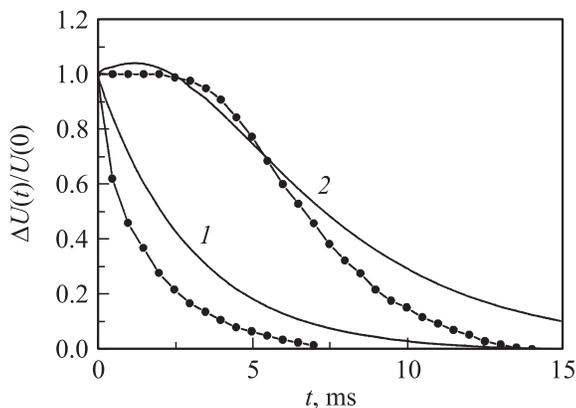


Рис. 4. Расчетные кривые релаксации сигнала фотопроводимости $U(t)/U(0)$ с учетом экситонов (упрощенная модель) при $\tau_1 = 3$ мс, $\tau_2 = 5$ мс; $k = 0$ (1), $k = 2$ (2) (см. формулу (1)). Экспериментальные точки (рис. 3) приведены для сравнения.

большая часть генерируемых светом электронов и дырок связывается в экситонах и таким образом выпадает из неравновесной проводимости, поскольку экситон является нейтральной частицей. После прекращения генерации ННЗ падающим светом ($t > \tau_p$) релаксация сигнала ФП будет определяться рекомбинацией по обычному механизму Шокли–Рида–Холла с $\tau = \tau_\infty$, в том числе электронов и дырок при тепловом распаде экситонов. Эту ситуацию для наглядности можно описать с помощью упрощенной модели, полагая, что измеряемый сигнал ФП пропорционален полному числу ННЗ в объеме слитка. В области $t \geq \tau_p$ нормированный сигнал ФП определяем соотношением

$$U(t)/U(0) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + k \cdot \text{th}\left(\frac{t}{\tau_2}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right). \quad (1)$$

Для примера на рис. 4 приведены расчетные кривые при $\tau_1 = 3$ мс, $\tau_2 = 5$ мс для случаев: $k = 0$ (без учета

экситонов) и $k = 2$, когда распад экситонов в значительной степени определяет форму кривой релаксации ФП (аномальная фотопроводимость). Для сравнения на рис. 4 приведены также экспериментальные точки (кривые 1 и 2, рис. 3). Учитывая недостаточную обоснованность для вывода формулы (1), мы не будем здесь комментировать результаты, приведенные на рис. 4, и отметим лишь следующее. Для случая $k = 0$ (кривая 1) эксперимент значительно хуже согласуется с расчетом, чем на рис. 3. Это означает, что экспонента не описывает релаксацию полного числа ННЗ, так как это возможно лишь в случае, когда поверхностная рекомбинация $S = 0$ [3]. Наряду с термической диссоциацией экситонов на свободные электроны и дырки имеет место также и излучательная аннигиляция экситонов. Измерение и исследование кинетики экситонного излучения позволяют окончательно выяснить механизм аномальной ФП при высоких уровнях генерации ННЗ.

Экситоны в полупроводниках при больших уровнях возбуждения достаточно интенсивно исследовались 25–30 лет назад (см., например, [6]), однако каких-либо аномалий в рекомбинации ННЗ не наблюдалось.

Список литературы

- [1] Г.И. Галкин. Тр. ФИАН, **128**, 3 (1981).
- [2] E. Yablonovich, T. Gmitter. Appl. Phys. Lett., **49**, 587 (1986).
- [3] П.А. Бородовский, А.Ф. Булдыгин, А.С. Токарев. ФТП, **38**, 1043 (2004). [P.A. Borodovskii, A.F. Buldygin, A.S. Tokarev. Semiconductors, **38** (9), 1005 (2004).]
- [4] П.А. Бородовский, А.Ф. Булдыгин, А.С. Токарев. Микроэлектроника, **35** (6), 403 (2006).
- [5] Б.В. Зубов, А.А. Маненков, В.А. Миляев, Г.Н. Михайлова, Т.М. Мурун, В.А. Санина, А.Ф. Сеферов. Тр. ФИАН, **100**, 51 (1977).
- [6] Э.Л. Нолле. Тр. ФИАН, **128**, 65 (1981).

Редактор Л.В. Беляков

Anomalous photoconductance relaxation in silicon at high injection levels

P.A. Borodovskii, A.F. Buldygin, S.V. Golod

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract A study of anomalous relaxation of photoconductance in silicon samples excited with pulse laser diode (1060 nm, 500 mW) was carry out. High injection level of excitation was used with or the microwave conductance measurements and the convenient photoconductance decay techniques. A striking phenomenon was observed at the initial part of transient photoconductance after the completion of the light pulse. A simplified model of anomalous effect was suggested including exciton generation at high excitation levels.