

РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОПРОВОДИМОСТИ И ШУМ $1/f$ В GaAs, ПОДВЕРГНУТОМ ДЕСТРУКТИВНОМУ СЖАТИЮ

Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л.

Исследована кинетика релаксации долговременной фотопроводимости в эпитаксиальных слоях GaAs, подвергнутых деструктивному сжатию. Обнаружена прямая корреляция между уровнем шума $1/f$ и амплитудой фотопроводимости.

При 300 К как уровень $1/f$ шума, так и амплитуда долговременной фотопроводимости монотонно возрастают по мере увеличения степени деструкции. Увеличение амплитуды фотопроводимости и появление в кинетике спада фототока по мере увеличения деструкции все больших и больших времен релаксации не связаны при 300 К с формированием потенциального рельефа, также возникающего в процессе деструкции.

При 77 К как уровень шума $1/f$, так и амплитуда компоненты долговременной фотопроводимости, не связанной с барьерным механизмом, не зависят от уровня деструкции.

Недавно в работе [1] было исследовано влияние деструктивного одноосного сжатия на шум $1/f$ в GaAs. Было показано, что уровень объемного шума $1/f$ чрезвычайно чувствителен к структурным несовершенствам, возникающим при деструкции. В условиях относительно слабой деструкции, когда изменение сопротивления образцов $\Delta R/R_0$ не превосходит ~ 0.1 , а подвижность при 77 К практически не меняется, уровень объемного шума возрастает на один порядок.

Ранее в работах [2, 3] для структурно совершенного GaAs была установлена связь между шумом $1/f$ и явлением долговременной релаксации фотопроводимости. Показано, что оба эти явления могут быть объяснены на основе одного и того же физического механизма, обусловленного существованием в реальных кристаллах хвоста плотности состояний вблизи края запрещенной зоны. В работе [4] аналогичная связь между явлением долговременной релаксации и шумом $1/f$ была установлена для Si. При этом показано, что по мере ухудшения структурного совершенства материала амплитуда долговременной фотопроводимости и уровень шума $1/f$ возрастают.

В настоящей работе исследована связь между шумом $1/f$ и явлением долговременной релаксации фотопроводимости в GaAs с различным уровнем структурного совершенства [5].

Исследовались те же образцы, для которых в работе [1] изучался шум $1/f$. Размеры, форма и параметры образцов подробно описаны в [1]. Фотопроводимость возбуждалась светом лампы накаливания. Особенности установки описаны в работе [4].

На рис. 1 показаны зависимости, характеризующие временную релаксацию фотопроводимости для трех различных образцов с разной степенью деструкции. Степень деструкции, так же как и в работе [1], характеризуется отношением сопротивления образца R к исходному сопротивлению R_0 до того, как образец подвергался сжатию. Зависимость, показанная на рис. 1, характеризует спад фотопроводимости в образце, не подвергавшемся сжатию ($R/R_0=1$). Эта зависимость полностью аналогична соответствующим зависимостям, приведенным и подробно проанализированным в работах [2, 3]. Из сравнения рис. 1, а и рис. 1, б и в видно, что по мере нарастания деструкции растет амплитуда

фотоответа, а спад фотопроводимости замедляется. Аналогичная картина наблюдалась также для Si [4].

Так же как и в кремнии [4], при 300 К никакие доступные в эксперименте поля не оказывают никакого влияния на процесс спада фотопроводимости. Мы прикладываем к образцу импульсы напряжения U_0 с амплитудой 6—7 В, что при длине образцов $L=10$ мкм соответствует средним значениям поля $E_0 \sim (6-7)$ кВ/см, вдвое превышающим пороговое значение эффекта Ганна. При однородном распределении поля таким значениям E_0 в GaAs при 300 К соответствует средняя энергия электронов в Γ -долине $\epsilon_{ст} \sim 0.15-0.17$ эВ.

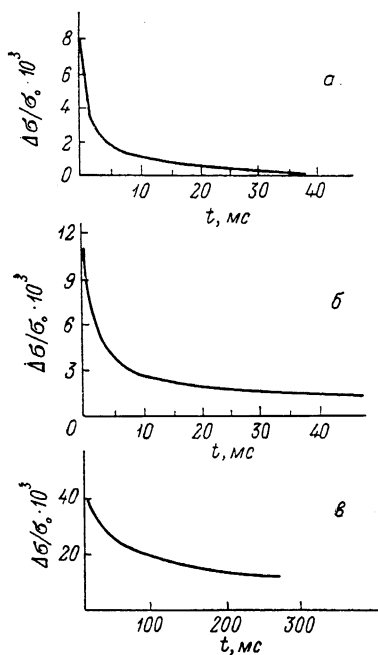


Рис. 1. Кинетика спада фотопроводимости в образцах при различном уровне деструкции, обусловленном сильным одноосным сжатием при $T=300$ К.

a — образец, не подвергавшийся сжатию ($R/R_0=1$); b — $R/R_0=1.52$; c — $R/R_0=6.12$.

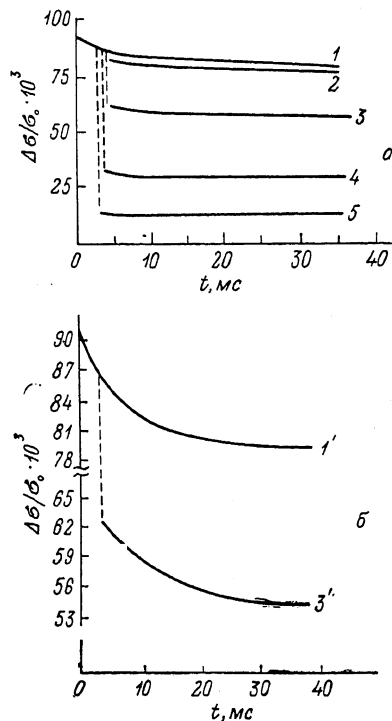


Рис. 2. Кинетика спада фотопроводимости в структурно совершенном образце, не подвергавшемся сжатию ($R/R_0=1$), при $T=77$ К.

a и b построены для одного и того же образца в разных масштабах. a) 1 — зависимость фотопроводимости от времени после выключения импульса света; 2—5 — через 3—5 мс после выключения света к образцу прикладывается импульс греющего поля длительностью $t_1=1$ мкс. Амплитуда импульса поля, В: 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4; 5 — 5. b) 1 и 3 повторяют кривые 1 и 3 рис. 2, a в другом масштабе.

В действительности при таких значениях E_0 в образцах возникает эффект Ганна, и амплитуда поля в домене E_{max} превышает 50—70 кВ/см. Тем не менее даже разогрев носителей, соответствующий столь сильным полям, не влияет на кинетику спада фотопроводимости.

На рис. 2 показаны зависимости $\Delta\sigma(t)$, характеризующие кинетику спада фотопроводимости при 77 К в образце, не подвергавшемся сжатию ($R/R_0=1$). Из сравнения рис. 1, a и 2, a видно прежде всего, что амплитуда фотопроводимости при 77 К возросла по сравнению с фотопроводимостью при 300 К более чем на порядок. Видно также, что фотопроводимость при 77 К спадает чрезвычайно медленно. Измерения показывают, что максимальные постоянные времени, характеризующие кинетику спада, во всяком случае много больше 10^6 с ($\tau \gg 10^6$ с). Таким образом, при изменении температуры в 4 раза (от 300 до 77 К) максимальные значения постоянной релаксации фотопроводимости возрастают по крайней мере на 9 порядков (от $\sim 10^{-2}$ до 10^7 с).

Аналогичные результаты наблюдались также и для чистого, структурно совершенного кремния [4].

Так же как и в кремнии [4], в кинетике спада фотопроводимости в GaAs при 77 К можно выделить две компоненты — «быструю» и «медленную». Быстрая компонента превалирует на временах $t \leq 5 \cdot 10^{-2}$ с и либо практически не поддается полевому гашению, либо зависит от температуры электронов очень слабо. Медленная компонента преобладает на временах $t > 5 \cdot 10^{-2}$ с, имеет барьерную природу и эффективно подавляется при разогреве электронов полем (полевое гашение фотопроводимости).

Рис. 2, а позволяет оценить эффективность полевого гашения медленной компоненты фотопроводимости. Амплитуда медленной компоненты монотонно уменьшается с ростом поля, однако не подавляется полностью даже при напряжении на образце $U_0 = 5$ В (кривая 5), что соответствует среднему по образцу полю $E_0 = U_0/L = 5$ кВ/см. Это обстоятельство указывает на существование в эпитаксиальных структурно совершенных пленках барьеров, существенно более высоких, чем в чистом структурно совершенном Si [4]. Для сравнения можно указать на то, что

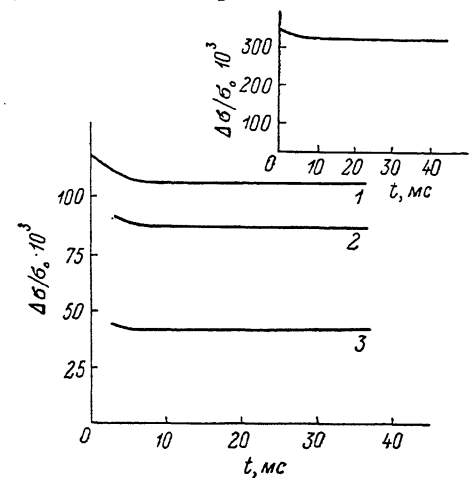


Рис. 3. Кинетика спада фотопроводимости при 77 К для образца с $R/R_0 = 1.52$.
1 — зависимость $\Delta\sigma/\sigma_0$ от времени после выключения импульса света; 2, 3 — через 3 мс после включения света к образцу прикладывается импульс греющего поля длительностью $t_0 = 1$ мкс. Амплитуда импульса, В: 2 — 3; 3 — 6. На вставке — зависимость $\Delta\sigma/\sigma_0(t)$ для образца с $R/R_0 = 6.12$.

медленная компонента фотопроводимости подавляется в кремнии в 4—5 раз уже при полях $E_0 = U_0/L \sim 500-600$ В/см [4].

Следует далее заметить, что увеличение длительности импульса «греющего» поля до значений, превышающих $t_0 \geq 2$ мкс, не приводит к увеличению эффективности полевого гашения. Это обстоятельство (см. подробный анализ в работе [4]) показывает, что время жизни неосновных носителей (дырок) в исследуемом GaAs *n*-типа не превосходит ~ 2 мкс даже в образцах, не подвергавшихся деструкции.

Из рис. 2, б ясно видно, что быстрая компонента фотопроводимости практически не поддается полевому гашению даже при значениях поля E_0 , превышающих порог эффекта Ганна. Следует, однако, заметить, что дальнейшее увеличение поля до значений 5—6 кВ/см приводит к частичному подавлению быстрой компоненты. Аналогичная ситуация, правда, при значительно меньших значениях поля E_0 характерна и для Si [4].

Если сравнить быструю компоненту фотопроводимости при 77 К с кривой $\Delta\sigma/\sigma_0(t)$, характеризующей кинетику спада фотопроводимости при 300 К (рис. 1, а), то можно заметить, что эти зависимости весьма близки. Обе они характеризуются максимальными постоянными времени спада $\tau \leq 10^{-2}$ с. Близки амплитуды этих кривых ($\sim 8 \cdot 10^{-3}$ для 300 и $\sim 12 \cdot 10^{-3}$ для 77 К). Наконец, обе кривые не чувствительны к полевому гашению фотопроводимости.

Таким образом, именно к быстрой компоненте в кинетике спада фотопроводимости при 300 К относятся все физические соображения, сформулированные в работе [2], и все расчеты, выполненные в работе [3]. В работах [2, 3] осталась незамеченной долговременная (медленная) компонента фотопроводимости при 77 К. Ошибка обусловлена тем, что возбужденная при 77 К медленная компонента фотопроводимости не спадает заметно даже в течение недель, и обнаружить ее просто по спаду фотопроводимости затруднительно. К тому же при 77 К образцы чрезвычайно фоточувствительны, и для возбуждения фотопроводимости достаточно даже очень слабой засветки. Поскольку в литературе данные о существовании столь больших времен релаксации в чистом,

структурно совершенном GaAs отсутствовали, мы оказались не готовы к регистрации столь больших постоянных времени. Мы воспроизвели все эксперименты, описанные в работах [2, 3], и убедились, что все экспериментальные результаты, описанные в этих работах, справедливы применительно к быстрой компоненте спада фотопроводимости.

На рис. 3 показаны зависимости $\Delta \sigma / \sigma_0(t)$ при 77 К для образцов, данные которых для 300 К приведены на рис. 1, б, в. Из сравнения кривой 1 рис. 3 с кривой 1 рис. 2, а видно, что, как и при 300 К, амплитуда фотопроводимости возрастает при уровне деструкции, соответствующей $R/R_0 \cong 1.52$, не слишком существенно. Однако кривые 2 и 3 рис. 3 показывают, что при деструкции заметно возрастает высота потенциальных барьеров, ответственных за медленную компоненту спада фотопроводимости. Из рис. 3 видно, что импульс полевого гашения с амплитудой 6 В уменьшает амплитуду медленной компоненты в подвергнутому деструкции образце в ~ 2.5 раза. Между тем, для GaAs, не подвергнутого сжатию, импульс с амплитудой 5 В подавляет амплитуду медленной компоненты в 6 раз. Из вставки к рис. 3 видно, что при сильной деструкции амплитуда медленной компоненты фотопроводимости возрастает очень сильно. При этом нужны очень сильные поля, чтобы добиться полевого гашения фотопроводимости.

Следует особо подчеркнуть, что амплитуда быстрой компоненты при 77 К не возрастает с увеличением степени деструкции образцов.

Таким образом, наблюдается прямая корреляция между уровнем шума $1/f$ и амплитудой фотопроводимости. При 300 К с ростом уровня деструкции монотонно растет уровень шума $1/f$ и также монотонно увеличивается амплитуда фотоответа. Даже очень сильные электрические поля не оказывают влияния на кинетику спада фотопроводимости. Очевидно, что долговременная релаксация при 300 К, даже в образцах с очень высоким уровнем деструкции (рис. 1, в) обусловлена не барьерным механизмом. Таким образом, возрастание уровня шума $1/f$, так же как и возрастание уровня долговременной фотопроводимости, по причинам, подробно проанализированным в работах [2-4], естественно связать с повышением по мере деструкции плотности уровней в хвосте плотности состояний.

Особенно интересно, что хотя в работе [4] в качестве фактора, обуславливающего деструкцию Si, были использованы нейтронное облучение, а для GaAs в настоящей работе и в работе [1] — деструкция посредством разрушающего сжатия, результаты и для шума $1/f$, и для долговременной фотопроводимости в Si и GaAs качественно совпадают.

При 77 К, как отмечалось в работе [1], уровень шума даже в образцах с предельно высоким уровнем деструкции ($R/R_0 \sim 10$) не превышает уровня шума в исходных, структурно совершенных образцах GaAs. Как видно из результатов, приведенных в настоящей работе (рис. 2, 3), при 77 К амплитуда быстрой, не связанной с наличием потенциальных барьеров компоненты фотопроводимости также не зависит от уровня деструкции.

Авторы признательны Ю. М. Гальперину и М. И. Дьяконову за внимание к работе и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 10. С. 1807—1815.
- [2] Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 10. С. 1828—1833.
- [3] Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е., Плоткин Д. А., Румянцев С. Л. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 5. С. 836—843.
- [4] Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 9. С. 1531—1538.
- [5] Shur M. GaAs devices and circuits. N. Y., 1987. 630 p.